



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

TEMZ 5232 -LIUSKAJOHDON KÄYTTÖÖNOTTO

TEKIJÄ/T: Maria Halonen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Maria Halonen	
Työn nimi TEMZ 5232 -liuskajohdon käyttöönotto	
Päiväys 30.5.2018	Sivumäärä/Liitteet 47
Ohjaaja(t) Testausinsinööri Marko Sorsa (Savonia EMC-laboratorio), Lehtori Jari Ijäs (Savonia-AMK)	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu, EMC-laboratorio	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli saattaa Savonian EMC-laboratoriolle aiemmin hankittu liuskajohto-niminen laite toimintakuntoon sekä suorittaa laitteelle käyttöönottomittaukset. Lisäksi työstä tuli laatia EMC-laboratorion vaatimat dokumentit eli tulospohja, raporttipohja sekä menetelmäohje. Menetelmäohjeeseen tuli kuvata tarkasti mittauksissa käytetty menetelmä mittausten toistettavuuden takaamiseksi tulevaisuudessa.</p> <p>Laitte oli tilattu EMC-laboratoriolle jo muutamia vuosia aikaisemmin, mutta laitteen käyttöönotto oli venynyt ja osa laitteen osista hävinnyt. Opinnäytetyö sisälsikin kaikki vaiheet puuttuvien osien kartoituksesta käyttöönottomittauksiin. Opinnäytetyön vaiheita oli puuttuvien osien tilaaminen, testauspöydän suunnittelu ja rakentaminen, liuskajohdon kokoaminen, mittauksissa tarvittavan laitteiston käytön opettelu, käyttöönottomittaukset sekä dokumentointi.</p> <p>Käyttöönottomittausten tavoitteena oli selvittää, kuinka tasaista kentänvoimakkuutta pystytään aikaansaamaan milläkin toimintataajuudella. Toisaalta haluttiin myös selvittää, mikä on suurin kentänvoimakkuus, joka liuskajohdolla saadaan muodostettua. Laitetta testattiin aluksi useilla erilaisilla kentänvoimakkuustasoilla ja lopuksi suoritettiin kalibrointiajot standardin ISO 11452-5 ja ajoneuvodirektiivin määrittelemille testitasoille 60 V/m, 100 V/m, 150 V/m ja 200 V/m.</p> <p>Laitte onnistuttiin saattamaan toimintakuntoon ja käyttöönottomittaukset saatiin suoritettua aikataulun puitteissa ennen kesää 2018. Käyttöönottomittausten tuloksista selvisi, että asiakastestejä pystytään suorittamaan taajuusalueella 20 MHz – 400 MHz kaikilla neljällä testitasolla ja taajuusalueella 400 MHz – 1 GHz testitasoilla 60 V/m ja 100 V/m. Taajuusalueella 400 MHz – 1 GHz ja testitasoilla 150 V/m ja 200 V/m kenttä ei enää pysy tasaisena, mutta liuskajohtoa pystytään käyttämään näilläkin tasoilla hyödyksi tuotekehitysmielessä. Opinnäytetyön toimeksiantaja pääsee hyödyntämään käyttöönottettua laitetta asiakastesteissä tulevaisuudessa.</p>	
Avainsanat EMC, EMC-testaus, liuskajohto, käyttöönottomittaukset	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Maria Halonen			
Title of Thesis Commissioning of a TEMZ 5232 Stripline			
Date	30 May 2018	Pages/Appendices	47
Supervisor(s) Mr. Marko Sorsa, Test Engineer and Mr. Jari Ijäs, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences, EMC laboratory			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to bring the previously acquired stripline device at Savonia's EMC laboratory in working order and perform the commissioning measurements for the device. In addition, the documents required by the EMC laboratory were compiled. These documents were a test memo template, a report template and a method instruction. The reproducibility of the stripline measurements were ensured by the method instruction.</p> <p>The stripline had been ordered for the EMC laboratory a few years earlier but the implementation of the device had delayed and some parts of the device had disappeared. The thesis included all the steps from finding out the missing parts to performing the commissioning measurements. The steps of the thesis were ordering the missing parts of the device, designing and constructing a test table, assembling the stripline, learning how to use equipment, performing the commissioning measurements and drawing up documentation.</p> <p>The aim of the commissioning measurements was to find out how steady field strength can be achieved at a certain operating frequency. It was also important to find out the maximum field strength that can be achieved with the stripline. The device was initially tested at several different levels of the field strength, and finally, calibration runs were carried out at the test levels of 60 V/m, 100 V/m, 150 V/m and 200 V/m defined by the ISO 11452-1 standard and the automotive directive.</p> <p>The device was successfully put into operation and the commissioning measurements were completed within the timetable before summer 2018. From the results of the commissioning measurements it was found out that client tests can be performed in the frequency range of 20 MHz – 400 MHz at all four test levels and in the frequency range of 400 MHz – 1 GHz at the test levels of 60 V/m and 100 V/m. In the 400 MHz to 1 GHz frequency range, the 150 V/m and 200 V/m test levels are no longer stable, but the stripline can be utilized at these levels for product development purposes. Savonia's EMC laboratory will be able to use the commissioned device for customer testing in the future.</p>			
Keywords EMC, EMC testing, stripline, implementation			
Public			

ESIPUHE

Kiinnostuin EMC-testauksesta kesällä 2017 suorittaessani Savonian EMC-laboratoriolla viimeistä harjoitteluani. Onnekseni harjoittelusta tarttui mukaani myös tulevan opinnäytetyöni aihe. Opinnäytetyön parissa on ollut mielenkiintoista työskennellä ja toivon, että pääsen hyödyntämään oppimiani asioita myös tulevaisuudessa.

Haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa ja Savonia EMC-laboratorion testauksinsinööriä Marko Sorsaa hyvästä ohjauksesta ja avusta opinnäytetyöni aikana. Kiitos myös toiselle opinnäytetyöni ohjaajalle Jari Ijäkselle.

Lisäksi haluan kiittää muitakin EMC-laboratorion työntekijöitä eli Jarkko Jokelaa ja Lauri Soinista avusta laitteen kasaamisessa, käyttöönottomittauksissa sekä työn kommentoimisessa matkan varrella. Erityiskiitos perheelle ja läheisille tuesta ja ymmärryksestä opinnäytetyöni teon aikana.

Kuopiossa 30.05.2018

Maria Halonen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
1.1	Termistö ja lyhenteet	8
1.2	Opinnäytetyön toimeksiantaja.....	9
2	SÄHKÖMAGNETISMI	10
2.1	Sähkökenttä	10
2.2	Magneettikenttä.....	11
2.3	Sähkömagneettinen säteily	12
2.4	Maxwellin yhtälöt	13
2.5	Sähkömagneettiset aallot	14
3	SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS	16
3.1	Sähkömagneettiset häiriöt	16
3.1.1	Häiriötyypit	17
3.1.2	Häiriöiden kytkeytymistavat	18
3.2	Emissiotestaus.....	18
3.3	Immuneettitestaus	19
4	TEMZ 5232 -LIUSKAJOHTO	20
4.1	Tekniset ominaisuudet	20
4.2	Rakenne ja toiminta	21
4.3	Liuskajohto standardin mukaan	22
4.4	Turvallisuus	24
5	ENNEN KÄYTTÖÖNOTTOA	25
5.1	Osien kartoitus ja hankinta	25
5.2	Testauspöydän suunnittelu ja rakennus.....	25
5.3	Liuskajohdon kokoaminen	26
5.4	Signaalipolku ja laitteet	29
5.5	Ohjelmistoasetukset.....	31
6	KÄYTTÖÖNOTTOMITTAUKSET.....	36
6.1	Koejärjestelyt	36
6.2	Tulokset ja niiden käsittely	37
6.2.1	60 V/m tason kalibrointimittaus.....	38
6.2.2	100 V/m tason kalibrointimittaus.....	39

6.2.3	150 V/m tason kalibrointimittaus.....	40
6.2.4	200 V/m tason kalibrointimittaus.....	41
6.2.5	Tulosten koonti	42
6.3	Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet.....	42
7	DOKUMENTOINTI.....	44
8	YHTEENVETO.....	45
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	46

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on saattaa Savonian EMC-laboratorion liuskajohto-niminen laite toimintakuntoon sekä suorittaa laitteelle käyttöönottomittaukset. Työ vaatii perehtymistä moottoriajoneuvojen radiohäiriöitä koskevaan direktiiviin sekä EMC-testeihin ja -testausmenetelmiin liittyviin standardeihin. Opinnäytetyön toimeksiantaja on Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratorio.

Liuskajohto on hankittu laboratoriolle jo muutamia vuosia aiemmin, mutta sen käyttöönotto on viivästynyt. Vuosien aikana osa laitteen osista on hävinnyt, joten työhön kuuluu kaikki tarvittavat vaiheet puuttuvien osien kartoituksesta käyttöönottomittausten suorittamiseen. Lisäksi työstä laaditaan tulospohja, raporttipohja sekä menetelmäohje, jolla taataan mittausten toistettavuus tulevaisuudessa. Lopulliset laaditut dokumentit luovutetaan ainoastaan tilaajalla, eikä niitä esitellä tässä opinnäytetyössä.

Liuskajohtoa tullaan käyttämään EMC-laboratoriolla säteilevän kentänsiedon testeissä. TEMZ 5232 -liuskajohdolla tehtävissä testeissä testattavana laitteena on ajoneuvoon asennettava sähkö- ja/tai elektroniikka-asennelma, jonka johtosarja altistetaan sähkömagneettiselle säteilylle. Liuskajohto soveltuu erityisen hyvin ajoneuvoympäristöön, sillä sen avulla pystytään synnyttämään jopa kymmentä kertaisia kenttiä verrattuna antennilla tehtäviin testeihin.

Käyttöönottomittaukset suoritetaan Savonian EMC-laboratorion radiokaiuttomassa mittahuoneessa ja mittauksissa käytetään R&S EMC32 -ohjelmistoa. Mittausten tarkoituksena on selvittää, kuinka tausta kenttää liuskajohdolla pystytään synnyttämään kullakin taajuusalueella. Käyttöönottomittauksissa tärkein tarkasteltava taajuusalue on 20 MHz – 220 MHz, joka on myös liuskajohdon nimellinen taajuusalue.

1.1 Termistö ja lyhenteet

AR = Amplifier Research, laitevalmistaja

BNC-liitin = Bayonet Neill-Concelman, koaksiaalikaapeleiden laitteisiin liittämiseen käytetty liitin

EMC = Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus

EMI = Electromagnetic Interference, sähkömagneettinen häiriö

ESD = Electrostatic Discharge, sähköstaattinen purkaus

EUT = Equipment Under Test, testattava laite

FINAS = Turvallisuus- ja kemikaaliviraston akkreditointipalveluyksikkö

GPIB = General Purpose Interface Bus, digitaalinen tiedonsiirtoväylä

RF = Radio Frequency, radiotaajuus

R&S = Rohde & Schwarz, saksalainen RF-laitevalmistaja

SWR = Standing Wave Ratio, seisovan aallon suhde

TEM = Transverse Electromagnetic, tila, jossa sähkömagneettinen aalto etenee poikittaisesti

TUKES = Turvallisuus- ja kemikaalivirasto

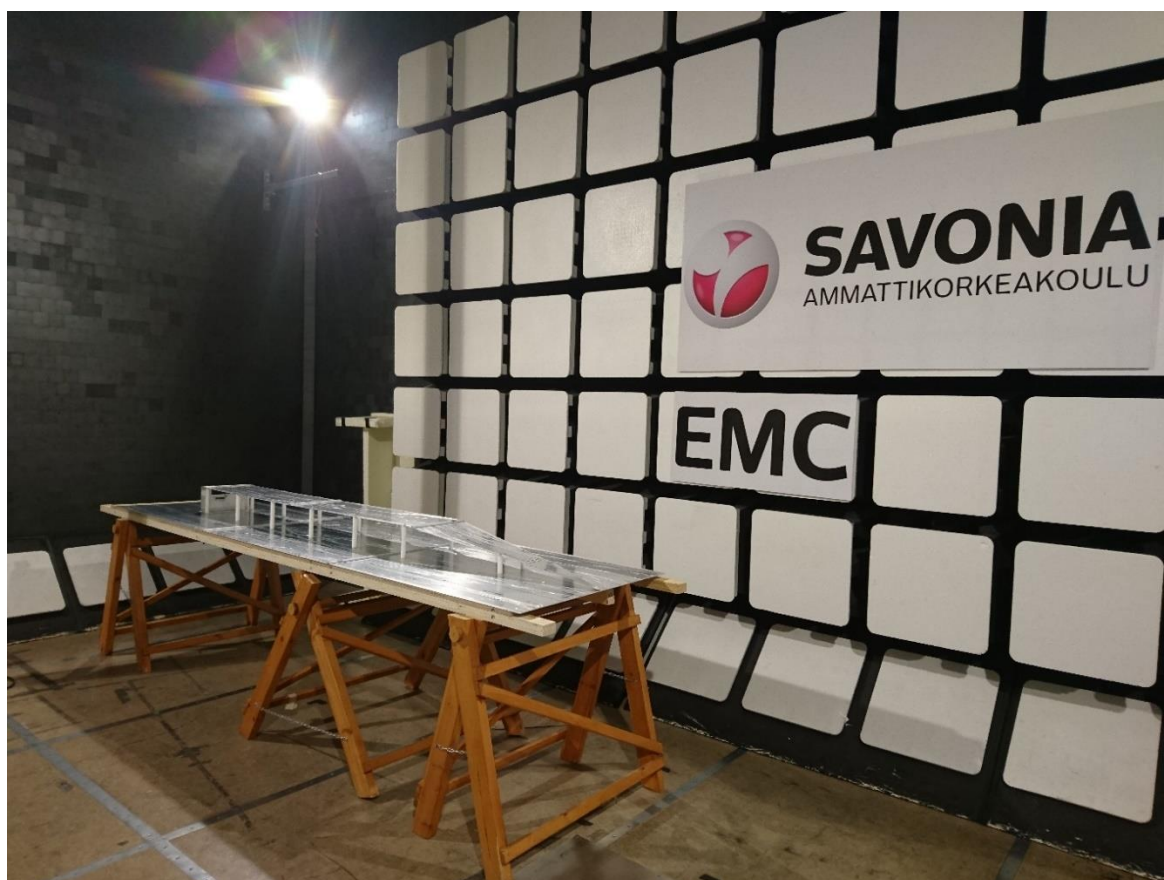
VSWR = Voltage Standing Wave Ratio, jännitteen seisovan aallon suhde

1.2 Opinnäytetyön toimeksiantaja

Savonian EMC-laboratorio on perustettu vuonna 2000 ja se sijaitsee Kuopion Technopoliksella. Laboratorion toiminta painottuu pääasiassa asiakasyrityksille tehtäviin EMC-mittauksiin. Syksyllä 2017 Savonian EMC-laboratoriolle myönnettiin FINAS-akreditointipalvelun akkreditointi (akkreditointitunnus T301), joka takaa laboratorion pätevyyden ja luotettavuuden. (Savonia-ammattikorkeakoulu.)

EMC-mittauksilla testataan laitteiden sähkömagneettista yhteensopivuutta. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden testaamisella varmistetaan, että laitteet toimivat moitteettomasti muiden laitteiden kanssa niille tarkoitetussa toimintaympäristössä. (Tukes 2017.)

EMC-laboratoriossa yleisesti testattavia tuoteryhmiä ovat kotitalous-, ajoneuvo- ja mittalaitteet sekä lääkinnälliset laitteet. Laboratorion testauspuitteet soveltuvat myös erinomaisesti teollisuusvaatimuksiin. Laboratoriolla on kaksi mittaushuonetta: radiokaiuton huone ja suojattu huone. Radiokaiuton huone on tarkoitettu säteilevien häiriöiden mittauksiin ja suojattu huone taas johtuvien häiriöiden testaukseen. Kuvassa 1 näkyy liuskajohto radiokaiuttomassa mittahuoneessa. (Savonia-ammattikorkeakoulu.)



KUVA 1 Savonia EMC-laboratorio, liuskajohto radiokaiuttomassa mittahuoneessa.

2 SÄHKÖMAGNETISMI

Sähkömagnetismi on fysiikan ala, joka käsittelee sähköisten ja magneettisten ilmiöiden vuorovaikutuksia. Sähkö- ja magneettikentät ovat siis toisistaan riippuvaisia. Sähkökenttä synnyttää sitä voimakkaamman magneettikentän, mitä nopeammin sähkökenttä vaihtelee ajan suhteen. Tämä toimii myös toiseen suuntaan: sinne, missä magneettikenttä muuttuu ajan mukana, syntyy sähköinen voima. (Lindell ja Sihvola (2.osa) 2002, 7.)

Vuonna 1864 James Clerk Maxwell (1831-1879) julkaisi ensimmäistä kertaa Maxwellin yhtälöt eli matemaattiseen muotoon kirjoittamansa tiedon sähkömagneettisista kentistä. Saksalainen Heinrich Hertz (1857-1894) oli taas ensimmäinen, joka pystyi kokeellisesti todistamaan näiden yhtälöiden oikeellisuuden vuonna 1888. Samalla hän todisti radioaaltojen olemassaolon. (Räisänen ja Lehto 2011, 13.)

Tässä luvussa käydään läpi sähkö- ja magneettikentät ensin erillään toisistaan ja sen jälkeen yhdessä, jolloin ne muodostavat sähkömagneettista säteilyä. Tämän lisäksi esitellään lyhyesti Maxwellin yhtälöt, jotka muodostavat koko sähkötekniikan perustan (Räisänen ja Lehto 2011, 20). Maxwellin yhtälöiden kautta päästään tarkastelemaan sähkömagneettisia aaltoja ja niiden käyttäytymistä.

2.1 Sähkökenttä

Tarkastellaan ensin staattisia sähkökenttiä eli kenttiä, jotka ovat ajasta riippumattomia (Lindell ja Sihvola (1.osa) 2002, 35). Sähkökentän syntymiseen tarvitaan sähkövarauksia. Sähkövaraukset liikkuvat paikasta toiseen eli ne eivät ilmesty tai häviä itsestään. Sähkövarausten häviämättömyys on yksi sähkömagneetiikan perusolettamuksista. Sähkövaraus synnyttää ympärilleen tilan, jota kutsutaan sähkökentäksi. Sähkövaraukset ovat joko positiivisia tai negatiivisia. Samanmerkkiset varaukset hylkivät toisiaan ja eri merkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa. Varauksen yksikkö on coulombi [C]. (Lindell ja Sihvola (1.osa) 2002, 8.)

Ennen sähkökentän voimakkuuden yhtälön määrittämistä täytyy määritellä yhtälö, joka määrittelee yksittäiseen pistevaraukseen kohdistuvan voiman. Tätä yhtälöä kutsutaan Coulombin laiksi ja se voidaan kirjoittaa näin:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}. \quad (1)$$

Kaavassa 1 yhtälön alkuosan termi $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ on Coulombin vakio, jossa ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys eli $8,8542 \times 10^{-12}$ F/m. Kaavan loppuosassa termit Q_1 ja Q_2 kuvaavat kahta eri varausta ja r näiden varausten välistä etäisyyttä toisistaan. Kaavasta voidaan päätellä, että mitä suuremmat ovat sähkövaraukset, sitä suurempi on voima. Toisaalta voima on myös sitä suurempi mitä lähempänä varaukset ovat toisiaan. Varausten ollessa kauempana toisistaan voima on taas pienempi. (Jokela 2006.)

Edellä määriteltiin yksittäiseen pistevaraukseen kohdistuva voima. Sähkökenttä voidaan määritellä tämän voiman avulla. Sähkökentän voimakkuus on siis se voima, joka kohdistuu kenttään asetettuun varaukseen jaettuna tämän varauksen suuruudella eli:

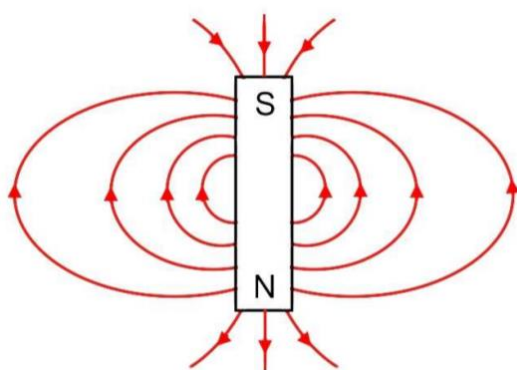
$$E = \lim_{Q \rightarrow 0} \frac{F}{Q}, \quad (2)$$

jossa E on sähkökentän voimakkuus [V/m], Q on sähkövaraus [C] ja F on voima [N]. (Lindell ja Sihvola (1.osa) 2002, 36.) Piirroksissa sähkökenttää kuvataan usein kenttäviivoilla. Kenttäviivojen tiheys kertoo kentän voimakkuuden: mitä tiheämmät viivat sitä suurempi kenttä. Nuolilla taas kuvataan kentän suuntaa: sähkökentän suunta kuvataan positiivisesta varauksesta negatiiviseen.

2.2 Magneettikenttä

Magneettikentäksi kutsutaan aluetta, jolla vallitsee magneettinen vuorovaikutus. Magneetin ympärillä on magneettikenttä (Lehto, Havukainen, Leskinen ja Luoma 2007, 15). Magneettikenttä pystytään saamaan aikaan myös sähkövirran tai muuttuvan sähkökentän avulla (Haarto, 2014). Magneettista vuorovaikutusta on esimerkiksi se, että magneettikenttä vaikuttaa toiseen magneettikentässä olevaan magneettiin tai virtajohtimeen (Lehto ym. 2007, 15). Magneettikentän sanotaan olevan homogeeninen kentän suunnan ja voimakkuuden ollessa kaikkialla sama (Lehto ym. 2007, 17).

Magneetilla on aina kaksi napaa: pohjoiskohtio (N) ja eteläkohtio (S). Aivan kuten sähkövaraustenkin tapauksessa magneettinapakin hylkii toista samannimistä magneettinapaa ja vetää puoleensa erinimistä magneettinapaa. Maan magneettinen pohjoisnapa on fysikaalisesti ajatellen eteläkohtio, sillä pohjoiskohtio pyrkii aina kääntymään kohti Maan magneettista pohjoisnapaa. (Haarto 2014.)



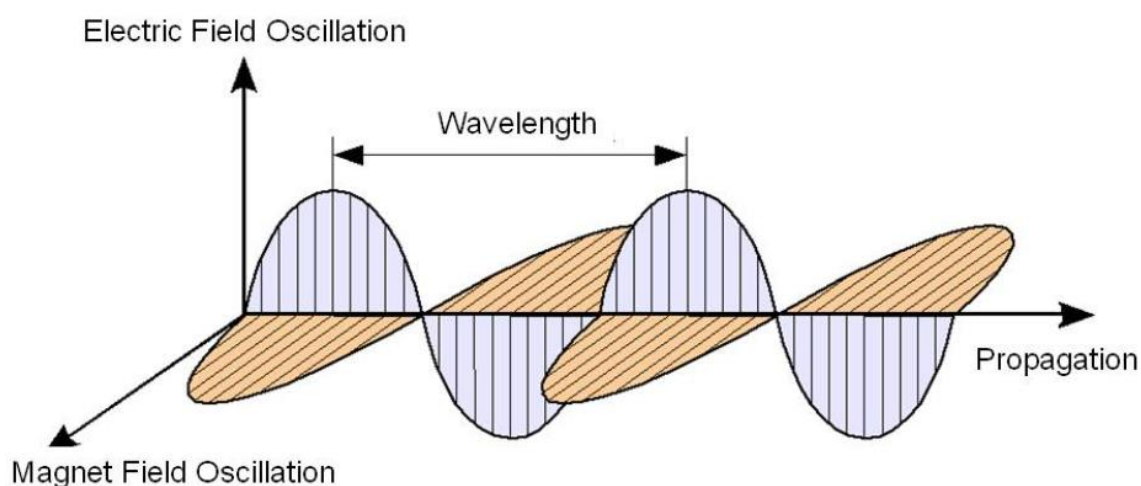
KUVA 2 Magneettikenttä kenttäviivojen avulla kuvattuna (Haarto 2014.)

Kuvassa 2 on kuvattu magneettikenttä kenttäviivojen avulla. Kenttäviivat ovat suljettuja käyriä ja niiden muoto osoittaa magneettikentän muodon. Kuvasta 2 huomaamme kenttäviivojen suunnan olevan magneetin ulkopuolella pohjoiskohtiosta (N) kohti eteläkohtiota (S). Toisaalta suunta magneetin sisäpuolella on päinvastainen. Kenttäviivojen tiheys kertoo magneettikentän voimakkuuden. Magneettivuon tiheys B kuvaa magneettikentän voimakkuutta. Magneettivuon tiheyden yksikkö on T (tesla). (Lehto ym. 2007, 17.)

2.3 Sähkömagneettinen säteily

Kohdissa 2.1 ja 2.2 määritettiin sähkö- ja magneettikenttien käsitteet. Sähkömagneettiseen säteilyyn synnyttämiseen tarvitaan näitä molempia kenttiä. Säteily syntyy varauksien epätasaisesta liikkeestä. Liike, joka ei ole suoraviivaista ja tasanopeuksista, synnyttää sähkömagneettista säteilyä. Sähkö- ja magneettikenttien värähdellessä ne synnyttävät sähkömagneettisia aaltoja, joita kutsutaan sähkömagneettiseksi säteilyksi. (Lindell ja Sihvola (2.osa) 2002, 133–134.)

Kuvassa 3 sähkömagneettinen säteily on havainnollistettu sähkö- ja magneettikenttien avulla. Y-akselilla näkyy sähkökentän värähtely ja z-akselilla magneettikentän värähtely. Näistä syntyy sähkömagneettinen aalto, joka etenee x-akselin osoittamaan suuntaan.



KUVA 3 Kuvaus sähkömagneettisesta säteilystä (Clean Energy Institute Wiki.)

Sähkömagneettinen säteily voidaan jakaa eri säteilylajeihin aallonpituuksien perusteella. Säteilylajeja ovat radioaallot, mikroaallot, infrapunasäteily, näkyvä valo, ultraviolettisäteily, röntgensäteily ja gammasäteily. Radioaalloilla on siis suurin aallonpituus ja gammasäteilyllä pienin. Kolmea viimeisintä voidaan havaita vain ilmakehän ulkopuolelta. (Letonsaari 2015.)

Toisaalta sähkömagneettinen säteily voidaan jakaa myös sen biologisten vaikutusten perusteella ionisoivaan ja ionisoimattomaan säteilyyn. Röntgen- ja gammasäteily kuuluvat ionisoivaan säteilyyn ja muut ionisoimattomaan säteilyyn. Ionisoiva säteily pystyy muuttamaan tai hajottamaan aineen rakennetta ionisoimalla sen atomeja, jolloin kohteessa pystytään havaitsemaan biologisia vaikutuksia. Ionisoimattomassa säteilyssä ei tapahdu ionisointia. (Sähköherkkyyssäätiö.)

Suurinta osaa sähkömagneettisesta säteilystä ei pysty aistein havaitsemaan lukuun ottamatta silmin havaittavaa näkyvää valoa ja lämpönä havaittavaa infrapunasäteilyä. Sähkömagneettista säteilyä on kuitenkin kaikkialla missä kulkee sähköä ja sitä pystytään mittaamaan hyvin tarkasti. Antenniin joh-

dettu sähköinen signaali synnyttää radioaaltoja, ja atomiydinten hajoamisessa tapahtuvista sähköisistä ilmiöistä taas syntyy gammasäteilyä. Sähkömagneettisen säteilyn lähteitä on äärettömästi, mutta muutamia arkipäivän esimerkkejä lähteistä ovat verkkovirran sähköjohdot, matkapuhelimet, tietokoneet ja näytöt, sähkökoneet, tv- ja radiolähtimet sekä WiFi. (Sähköherkkyysäätiö.)

2.4 Maxwellin yhtälöt

Jo ennen Maxwellin yhtälöitä tunnettiin sähköstatiikan ja magnetostatiikan lakeja: Gaussin laki, Ampèren laki ja Faradayn induktiolaki. Maxwell tutki näitä lakeja, kokosi ne yhteen ja kirjoitti ne matemaattiseen muotoon. Lisäksi hän lisäsi Ampèren lakiin siirrosvirtatermin. Maxwellin yhtälöt on kirjoitettu differentiaali- ja integraalimuotoihin. Kummatkin muodot ovat yhtäpitäviä ja sopivamman voi valita tilanteen mukaan. (Räisänen ja Lehto 2011, 13; 15.)

Alla olevissa kaavoissa 3–6 on esitetty Maxwellin yhtälöt differentiaalimuodossa ja kaavoissa 7–10 on samat yhtälöt integraalimuodossa.

$$\text{I} \quad \Delta \times \vec{D} = \rho \quad (3) \quad \oint_S \vec{D} \times d\vec{S} = \int_V \rho dV \quad (7)$$

$$\text{II} \quad \Delta \times \vec{B} = 0 \quad (4) \quad \oint_S \vec{B} \times d\vec{S} = 0 \quad (8)$$

$$\text{III} \quad \Delta \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5) \quad \oint_T \vec{E} \times d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \times d\vec{S} \quad (9)$$

$$\text{IV} \quad \Delta \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (6) \quad \oint_T \vec{H} \times d\vec{l} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \times d\vec{S} \quad (10)$$

(Räisänen ja Lehto 2011, 17–18.)

\vec{E} = sähkökentän voimakkuus [V/m]

\vec{D} = sähkövuon tiheys [C/m² = As/m²]

\vec{H} = magneettikentän voimakkuus [A/m]

\vec{B} = magneettivuon tiheys [Wb/m² = Vs/m²]

\vec{J} = sähkövirran tiheys [A/m²]

ρ = sähköinen varaustiheys [C/m³ = As/m³] (Räisänen ja Lehto 2011, 16.)

Antti Räisänen ja Arto Lehto ovat esittäneet kirjassaan *Radiotekniikan perusteet* (2011) Maxwellin yhtälöt kvalitatiivisesti sanallisessa muodossa seuraavalla tavalla:

- I Sähköisten varauksien jakauma määrää sähkökentän.
 - II Magneettivuoviivat ovat suljettuja, eli magneettisia varauksia ei ole olemassa.
 - III Muuttuva magneettivuo synnyttää sähkökentän, ts. pinnan läpi kulkevan magneettivuon muutos aiheuttaa sähkömotorisen voiman.
 - IV Sekä liikkuva varaus (virta) että muuttuva sähkövuo synnyttävät magneettikentän.
- (Räisänen ja Lehto 2011, 20.)

Maxwellin yhtälöiden avaamisen jälkeen pystytään ymmärtämään, kuinka sähkömagneettinen aalto-liike syntyy. Muuttuva virta luo muuttuvan magneettikentän, joka luo muuttuvan sähkökentän. Muuttuva sähkökenttä taas luo edelleen muuttuvan magneettikentän. Sykli jatkuu loputtomasti ja syntyy sähkömagneettista aaltoliikettä. (Räisänen ja Lehto 2011, 20.)

2.5 Sähkömagneettiset aallot

Sähkömagneettisella säteilyllä on erilaisia kentänjakaumia eli aaltomuotoja. Jokaisella aaltomuodolla on oma etenemisnopeus, vaimennus ja rajataajuus. Tilannetta, jossa aalto etenee samanaikaisesti useammalla aaltomuodolla, kutsutaan monimuotoetenemiseksi. Monimuotoeteneminen voi aiheuttaa signaalin vääristymistä, mutta sen haitat pystytään välttämään käyttämällä johtoa niin matalalla taajuudella, että vain yksi aaltomuoto eli perusaaltomuoto pystyy etenemään. (Räisänen ja Lehto 2011, 36.)

Aaltomuodot jaetaan TEM-aaltoihin, TE-aaltoihin ja TM-aaltoihin. TEM-aallot ovat poikittaissähkömagneettisia aaltoja. Näiden aaltomuotojen sähkö- ja magneettikentillä ei ole lainkaan etenemissuuntaista eli z-suuntaista komponenttia. Häviöttömässä väliaineessa voi edetä vain TEM-aaltomuotoja. TE-aaltoja kutsutaan poikittaissähköisiksi aalloiksi, koska niiden sähkökentällä on vain poikittaiskomponentti. TM-aallot sen sijaan ovat poikittaismagneettisia aaltoja, sillä niiden magneettikentällä on vain poikittaiskomponentti. (Räisänen ja Lehto 2011, 36–38.)

Yllä lueteltujen sähkömagneettisten aaltojen käyttäytyminen riippuu paljon aallonpituuksista. Aallonpituus tyhjiössä on:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (11)$$

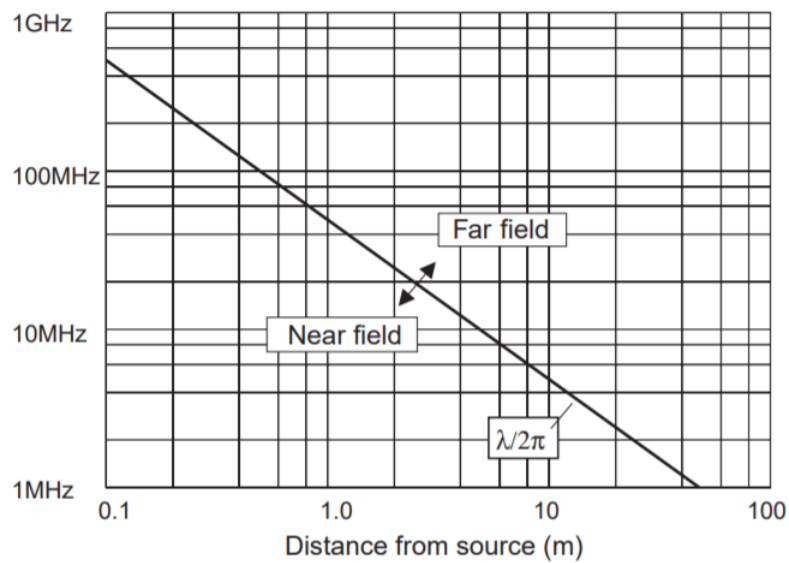
jossa c on valonnopeus tyhjiössä $c = 2,998 \times 10^8$ m/s ja f [Hz] on taajuus. (Franciscus Jozua van Dam 2011, 7.)

Säteilevän lähteen ympärille muodostuva sähkömagneettinen kenttä voidaan jakaa etäisyyden d perusteella lähikenttään, jossa $d < \lambda/2\pi$ ja kaukokenttään, jossa $d > \lambda/2\pi$. Lähikenttä koostuu sähkö- ja magneettikentästä, kun taas kaukokentän muodostavat tasoaallot. Lähi- ja kaukokenttien siirtymäalue on alue $\lambda/2\pi$ ympäristössä tai noin 1/6 aallonpituutta. Sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuden suhdetta kuvataan aaltoimpedanssilla (E/H). Aaltoimpedanssin suuruus riippuu lähteen ominaisuuksista sekä etäisyydestä d . Siirtymäetäisyys taajuuden funktiona on kuvattu kuvassa 4. (Schaffner 2000, 39.)

Kaukokentässä sähkö- ja magneettikenttä ovat toisiaan sekä etenemissuuntaansa vastaan kohtisuorassa ja niiden amplitudi (värähdyslaajuus) vaimenee suhteessa $1/d$. Kaukokentän impedanssi on sama kuin tyhjiössä:

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}}{8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}}} = 377 \Omega. \quad (12)$$

Kaava 12 on saatu johdettua Maxwellin aaltoyhtälöistä. Lähikentässä taas aaltoimpedanssi määräytyy lähteen ominaisuuksien mukaan. Sähkö- ja magneettikentät eivät ole lähikentässä samassa kulmassa toisiinsa nähden ja ne vaimenevat suhteessa $1/d^2$ tai $1/d^3$. (Schaffner 2000, 39; Honkanen.)



KUVA 4 Siirtymäetäisyys taajuuden funktiona (Schaffner 2000, 40.)

3 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS

EMC (*Electromagnetic Compatibility*) eli sähkömagneettinen yhteensopivuus määritellään Turvallisuus- ja kemikaaliviraston (Tukes) sivuilla laitteen moitteettomaksi toiminnaksi muiden laitteiden kanssa niille tarkoitetuissa toimintaympäristössä. Laitteella tarkoitetaan "mitä tahansa loppukäyttäjälle tarkoitettua laitetta tai kiinteää asennusta, joka voi aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä tai jonka toimintaan sähkömagneettinen häiriö voi vaikuttaa". Laitteiden häiriötön toiminta taataan sähkömagneettisella yhteensopivuudella. (Tukes 2017.)

Kaikilla EU-alueella markkinoilla olevilla sähkölaitteilla tulee olla CE-merkki. Valmistaja pystyy CE-merkinnällä vakuuttamaan, että tuote on EU-lainsäädännön vaatimusten mukainen. CE-merkin saamiseksi vaaditaan sähkölaitteilta myös hyväksytysti suoritettut EMC-testit. Kuvassa 5 näkyy CE-merkintä. (Tukes 2017.)

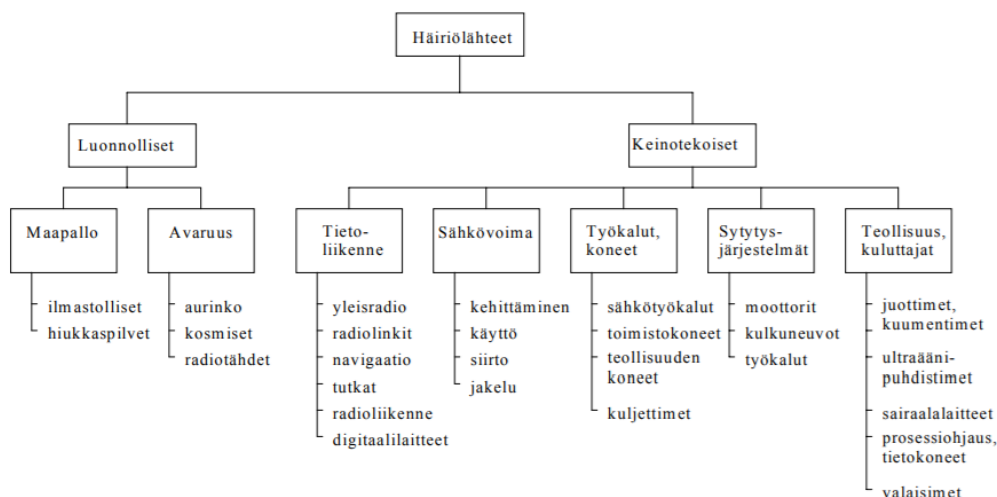


Kuva 5 CE-merkki (Tukes 2017.)

Tässä luvussa tutustutaan ensin erilaisiin sähkömagneettisiin häiriöihin ja niiden kytkeytymistapoihin. Lisäksi tutustutaan erilaisiin EMC-testityyppeihin. EMC-testit voidaan luokitella häiriönsieto- eli emisiotestauksiin ja häiriönpäästö- eli immunitetitestauksiin.

3.1 Sähkömagneettiset häiriöt

Sähkömagneettisen säteilyn lähteitä on joka puolella, kuten aiemmin kohdassa 2.3 todettiin. Kaikki nämä säteilyn lähteet eli laitteet ovat vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa. Joskus laitteet saattavat olla vuorovaikutuksessa keskenään ei-toivotulla tavalla, eli esimerkiksi laite häiriintyy toisen laitteen toiminnasta. Lisäksi on mahdollista, että häiriöitä esiintyy saman systeemin sisällä, systeemin eri osien välillä (Williams 2007, 7). Puhutaankin systeemin sisäisestä EMC:stä ja järjestelmien välisestä EMC:stä riippuen kummasta näkökohdasta asiaa tarkastellaan (Williams 2007, 7). Sähkömagneettisia häiriöitä (EMI) ovat kaikki sähkömagneettiset ilmiöt, jotka eivät ole hyötykäyttöön tarkoitettuja. Häiriöt laitteiden välillä voivat levitä joko säteilemällä tai johtimia pitkin. Kuvassa 6 on esitetty erilaisia sähköisten häiriöiden lähteitä. (Tukes 2017.)



Kuva 6 Sähköisten häiriöiden lähteitä (Häkkinen, Esa; Fallström, Kim; Haapalinna, Atte; Kärhä, Petri, 1999, 4.)

3.1.1 Häiriötyypit

Sähkömagneettisen häiriön seurauksien vakavuus riippuu valvottavasta laitteesta. Joissakin tapauksissa häiriöstä voi olla vain vähän haittaa, toisissa se voi olla taloudellisesti haitallista tai jopa hengenvaarallista. (Williams 2007, 9.) Käydään lyhyesti läpi erilaisia sähkömagneettisia ilmiöitä, jotka voivat aiheuttaa häiriöitä. Ilmiöt eivät rajoitu radiopohjaisiin ilmiöihin vaan myös hetkellisiin ilmiöihin ja tehoon liittyviin häiriöihin. (Williams 2007, 7)

Tim Williams listaa kirjassaan *EMC for Product Designers* (2007) sähkömagneettiset ilmiöt, joiden voidaan odottaa aiheuttavan häiriöitä ohjausjärjestelmissä, seuraavalla tavalla:

- syöttöjännitteen keskeytykset, kuopat, syöksyaallot ja huojunta
- nopeat ohimenevät ylijännitteet (piikit ja syöksyaallot) syöttö-, signaali- ja ohjauslinjoissa
- radiotaajuiset kentät (pulssi ja jatkuva), jotka on kytketty suoraan laitteeseen tai siihen kytkettyihin kaapeleihin
- sähköstaattinen purkaus (ESD) ladatusta kohteesta tai ihmisestä
- matalataajuiset magneetti- tai sähkökentät. (Williams 2007, 9.)

Jokaiseen yllä mainittuun ilmiöön liittyvät stressitasot riippuvat hyvin paljon paikallisesta ympäristöstä. Teollisuusympäristö on stressaavampi kuin esimerkiksi asuinympäristö. (Williams 2007, 9.) Tästä johtuen myös EMC-vaatimukset eroavat riippuen paikallisesta ympäristöstä: asunto- ja teollisuusympäristöön on määritelty erilaiset häiriötasot (SFSedu.fi).

3.1.2 Häiriöiden kytkeytymistavat

Tärkeimpiä häiriöiden kytkeytymistapoja on neljä: kapasitiivinen kytkeytyminen, induktiivinen kytkeytyminen, johtumalla kytkeytyminen sekä sähkömagneettinen kytkeytyminen. Kenttien kytkeytyminen voidaan ratkaista Maxwellin yhtälöiden avulla, mutta ratkaisu on usein hyvin monimutkainen. Esitellään kuitenkin lyhyesti, ilman kaavoja, mitä eri kytkeytymistavat tarkoittavat. (Häkkinen ym. 1999, 7.)

Sähkökenttä dominoi suuri-impedanssisessa kentässä, jolloin kytkeytyminen tapahtuu kapasitiivisesti. Kapasitiivisessa kytkeytymisessä tahaton kapasitanssi syntyy kahden johtimen välille tai kytkeytyminen tapahtuu muuntajan käämien välisen kapasitanssin kautta. Kytkeytymisestä muodostuu tyypillisesti ylipäästösuodatin. Piirissä tapahtuu jännitteenjako keskinäiskapasitanssin ja piirin osittain resistiivisen impedanssin välillä. (Kajaanin AMK.)

Pieni-impedanssisessa kentässä taas dominoi magneettikenttä, josta seuraa kytkeytymisen tapahtuminen induktiivisesti. Induktiivisessa kytkeytymisessä johtimessa kulkeva virta aiheuttaa magneettikentän H , joka kytkeytyy mittausspiirin johdinten muodostamaan virtasilmukkaan indusoiden häiriöjännitettä. Suurilla taajuuksilla muodostuu helposti induktiivinen kytkentä, joten muun muassa taajuutta pienentämällä voidaan induktiivista kytkeytymistä vähentää. (Kajaanin AMK.)

Johtumalla kytkeytyminen tarkoittaa sitä, että johtimen kulkiessa häiriöisessä ympäristössä kytkeytyy siihen häiriöitä sähkö- ja magneettikentistä sekä galvaanisesti. Häiriöt kulkeutuvat johtimen mukana paikasta toiseen, ellei ole käytetty asianmukaista suodatusta. (Kajaanin AMK.)

Häiriöiden siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä kutsutaan sähkömagneettiseksi kytkeytymiseksi (Honkanen). Elektroniset laitteet ovat hyvin herkkiä sähkö- ja magneettikenttien muutoksille. Sähkömagneettinen kytkeytyminen on merkittävää radiotaajuuksilla. Piirien mitat voivat olla suuruusluokaltaan aallonpituutta vastaavia, jolloin johdot toimivat vastaanottoantenneina. (Kajaanin AMK.)

3.2 Emissiotestaus

Emissiotestausta kutsutaan toiselta nimeltään myös häiriöpäästöttestaukseksi. Säteileviä häiriöpäästöjä testattaessa mitataan testattavan laitteen (EUT) tahattomasti aiheuttamien päästöjen sähkömagneettisen kentän voimakkuus. Toisin sanoen tarkastellaan, miten paljon testattava laite aiheuttaa häiriöitä muille, samassa toimintaympäristössä oleville, laitteille säteilyn kautta. Mittauksilla selvitetään, kuinka suuret päästöt ovat ja pysyvätkö ne vaadituissa rajoissa. Johtuvia häiriöpäästöjä mitattaessa tarkastellaan taas johtumalla siirtyviä häiriöitä. (EMC Fastpass.)

3.3 Immuneettitestausta

Immuneetti- eli häiriönsietotestausta on emissiotestauksen vastakohta, sillä siinä tarkastellaan EUT:n kykyä sietää ympäristöstään tulevia häiriöitä. Immuneettitestausta EUT altistetaan sähkömagneettisille ilmiöille ja tarkkaillaan, miten immuuni EUT ilmiöille on. Säteilevien häiriöiden immuneettitestausta laite altistetaan tietyn amplitudin omaavalle sähkökentälle eri taajuusalueilla, ja tarkkaillaan, kuinka hyvin laite toimii altistuksen alaisena. Johtuvien häiriöiden immuneettitestausta avulla simuloidaan ulkoisten teho- ja signaalijohtimien normaali jännite- ja virtaympäristö. Tässä opinnäytetyössä keskitytään immuneettitestaukseen, sillä liuskajohto kuuluu immuneettitestausta piiriin. (EMC Fastpass.)

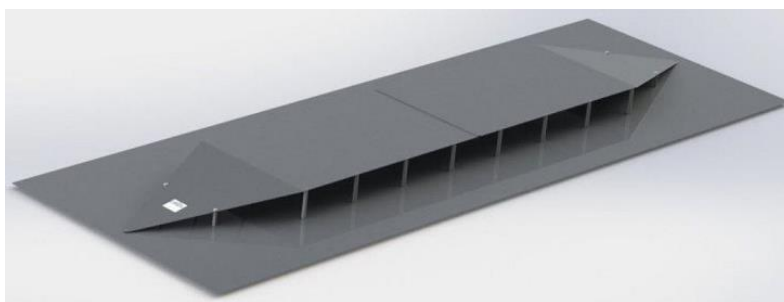
4 TEMZ 5232 -LIUSKAJOHTO

Tässä osiossa tutustutaan liuskajohdon teknisiin ominaisuuksiin, rakenteeseen ja toimintaan. Lisäksi esitellään työssä tarvittavat standardit ja käydään läpi ISO 11452-5 -standardin tärkeimmät kohdat. Lopuksi todetaan turvallisuuteen liittyvät asiat, jotka on otettava huomioon liuskajohtoa käytettäessä. Valmistajan manuaalin ja standardien lisäksi työssä tuli perehtyä moottoriajoneuvojen radiohäiriöitä koskevaan direktiiviin. Kyseinen direktiivi asettaa omat rajat ja määräykset testille.

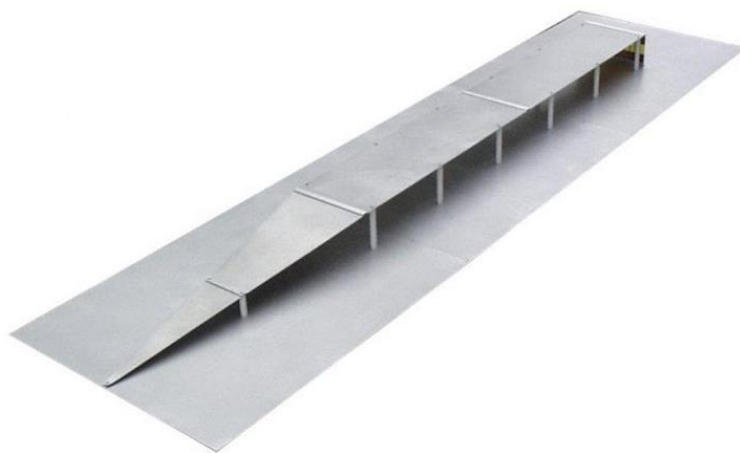
Liuskajohtoa käytetään ajoneuvoihin asennettavien sähkö- ja/tai elektroniikka-asennelmien säteilevän kentänsiedon testeihin. Liuskajohto toimii antennin tapaisesti ja sitä käytetäänkin testeissä antennin asemasta. Erona antenneilla tehtäviin testeihin on se, että testeissä ei kuormiteta kokonaista laitetta vaan sen johtosarjaa. Johtosarjan altistaminen pätee TEMZ 5232 -liuskajohdolla tehtäviin testeihin, sillä on olemassa myös liuskajohtoja, joilla kuormitetaan koko laitetta tai ajoneuvoa. Liuskajohdon avulla pystytään synnyttämään jopa kymmenkertaisia kenttiä antenniin verrattuna, joten se soveltuu hyvin ajoneuvoympäristöön. Lisäksi häviöt ovat pienempiä käytettäessä liuskajohtoa. Liuskajohdolla pystytään pienillä tehoilla saamaan aikaan suuria kentänvoimakkuuksia. (Williams 2007, 168–169.)

4.1 Tekniset ominaisuudet

Alla olevissa kuvissa 7 ja 8 on esitetty mallinnokset symmetrisestä ja epäsymmetrisestä liuskajohdosta. Tässä työssä käytetty liuskajohto on kuvan 8 kaltainen 90 Ω avoin, epäsymmetrinen TEMZ 5232 -liuskajohto. TEMZ 5232 -liuskajohtoa voidaan käyttää luomaan TEM-aaltoja 220 MHz:iin asti, sillä sen nimellinen taajuusalue on DC – 220 MHz, jolloin kenttä etenee TEM-tilassa. Käyttökelpoinen taajuusalue jatkuu kuitenkin 1 GHz:iin asti, mutta 220 MHz:stä ylöspäin esiintyy TEM-tilaa korkeampia tiloja. Liuskajohdon päätevastuksen tehoarvo on 60 W, jonka tulisi laitteen manuaalin mukaan riittää tuottamaan 500 V/m suuruinen kentänvoimakkuus. (Schwarzbeck Mess-Elektronik.)



KUVA 7 Symmetrinen liuskajohto (Reliant EMC.)



KUVA 8 Epäsymmetrinen liuskajohto (Reliant EMC.)

4.2 Rakenne ja toiminta

Liuskajohto koostuu alumiinilevyistä, päätevastuksesta, syöttöpään liittimestä sekä eristävistä muovista tukitangoista. Kuten kuvasta 8 voidaan nähdä, valkoisten muovitankojen päällä olevan liuskan alla on kolme isoa alumiinilevyä. Nämä kolme alumiinilevyä muodostavat maatasen. Päällä oleva liuska on johtava liuska, jonka kapenevassa päässä sijaitsee syöttöliitin eli N-liitin ja toisessa päässä päätevastus.

Signaaligeneraattorin syöttämä ja vahvistimen vahvistama signaali syötetään N-liittimen kautta johtavaan liuskaan. Sähkömagneettinen kenttä syntyy johtavan liuskan ja maatasena toimivien alumiinilevyjen väliin. Kenttä päätetään liuskajohdon loppupäässä sijaitsevan päätevastuksen avulla. (Williams 2007, 169.)

Liikuttaessa liuskajohdon nimellisellä taajuusalueella kentänvoimakkuus on pieni liuskajohdon johtavan liuskan reunoilla ja suuri johtavan liuskan keskikohdassa. Kenttä on kuitenkin melko yhtenäinen verrattuna suurempiin taajuuksiin. TEM-toimintatilassa on hyvin pienet häviöt, jotka johtuvat säteilystä ja muovisten tukitankojen dielektrisistä häviöistä. Noin 8 % häiriötehosta heijastuu takaisin lähteeseen johtuen liuskajohdon ominaisesta $90\ \Omega$:n linjaimpedanssista. Siirryttäessä 220 MHz:ä korkeampiin taajuuksiin kenttä käyttäytyy aiempaa päinvastaisesti: kentän voimakkuus on pieni liuskajohdon keskellä ja saavuttaa suurimmat arvonsa liikuttaessa kohti liuskajohdon reunoja. (Schwarzbeck Mess-Elektronik.)

Päätevastuksen yhteydessä on myös BNC-liitin, johon liitetyllä sopivalla mittarilla pystytään mittaamaan liuskajohdon muodostamaa kenttää. BNC-liittimen käyttö ei ole pakollista, sillä kenttää pystytään mittaamaan myös käyttämällä tarkoitukseen soveltuvaa kentänvoimakkuusanturia. Tässä työssä kentän mittaamiseen käytettiin kentänvoimakkuusanturia. (Schwarzbeck Mess-Elektronik.)

4.3 Liuskajohto standardin mukaan

ISO 11452 -standardisarja käsittelee maantiekulkuneuvojen komponenttien testausmenetelmiä säteilevän kapeakaistaisen sähkömagneettisen energian häiriöille. Standardin ensimmäinen osa esittelee yleiset periaatteet ja terminologian. Tässä osiossa keskitytään standardin viidenteen osaan ISO 11452-5, jossa käydään läpi varsinaisesti liuskajohtoon liittyvät asiat.

Vaikka tässä kohdassa avataan joitakin ISO 11452-5 -standardin kohtia, osa asioista on kirjattu ainoastaan menetelmäohjeeseen, kuten EUT:n asetteluun liittyvät asiat. ISO 11452-1 -standardin määrittämiä asioita käydään sen sijaan läpi tarkemmin kohdassa 5.5, jossa määritellään ohjelmistoasetuksia testiä varten.

TEMZ 5232 -liuskajohdon avulla suoritettavissa testeissä koko testattavaa laitetta ei altisteta häiriöille, vaan häiriöille altistetaan testattavan laitteen eli EUT:n johtosarja. Menetelmä rajoittuu kuitenkin niihin laitteisiin, joiden johtosarja on halkaisijaltaan korkeintaan yksi kolmasosa liuskajohdon korkeudesta. Sähkömagneettisen häiriön tulee muodostaa jatkuvaa kapeakaistaista sähkömagneettista kenttää. (ISO 11452-5 2002, 1;5.)

Standardi antaa kaksi vaihtoehtoista kentän kalibrointitapaa. Toisessa tavassa käytetään kenttäanturia, jonka korkeuden tulisi olla alle yksi kolmasosa liuskajohdon korkeudesta, jotta saadaan luotettavia tuloksia. Kenttäanturi asetetaan mahdollisimman keskelle johtavan liuskan alle ottaen huomioon pituus- ja poikittaissuuntaiset akselit. Standardi esittää myös laskennallisen tavan, jossa kentän voimakkuus voidaan laskea kaavalla

$$|E| = \frac{\sqrt{P \times Z}}{h}, \quad (13)$$

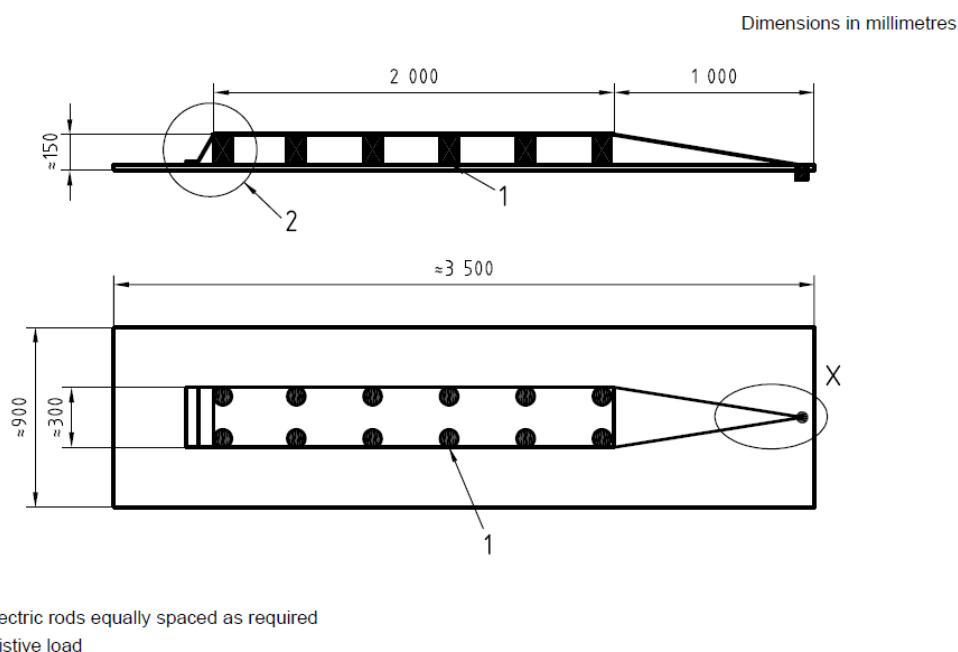
jossa E on kentänvoimakkuus [V/m], P on nettoteho [W], Z on liuskajohtimen ominaisimpedanssi [Ω] ja h on johtavan liuskan korkeus maatasosta [m]. Pienkenttäanturia käytetään laskennallisen tuloksen varmentamiseen. (ISO 11452-5 2002, 5.)

Standardissa esitetään myös kaava, josta nähdään miten liuskajohdon ominaisimpedanssi Z [Ω] muodostuu:

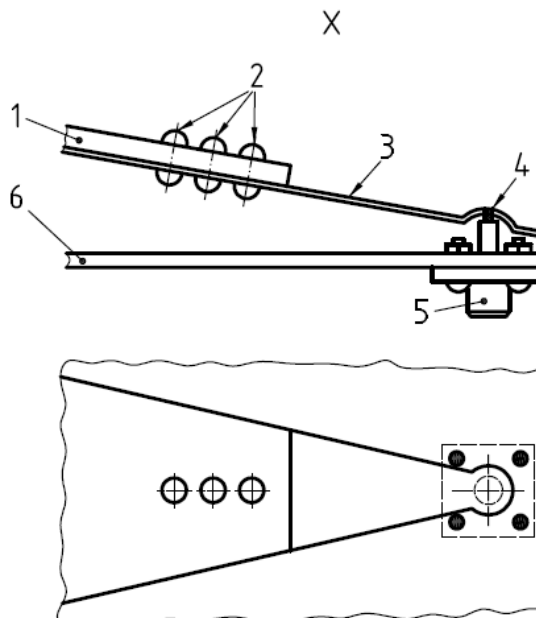
$$Z = \frac{120 \times \pi}{\frac{b}{h} + 2,42 - 0,44 \times \frac{h}{b} + \left(1 - \frac{h}{b}\right)^6}. \quad (14)$$

Kaavassa 14 b on aktiivisen johtimen leveys [mm], h on aktiivisen johtimen korkeus maatasosta [mm] ja $\pi = 3,14$. Kaavasta näemme, että liuskajohdon ominaisimpedanssi riippuu siis aktiivisen johtimen leveyden ja korkeuden suhteesta.

Standardista ISO 11452-5 löytyy kaksi selventävää kuvaa liuskajohdon rakenteesta. Kuvassa 9 on liuskajohdon rakenne kuvattuna sivusta ja ylhäältäpäin sekä suuntaa antavat mitat merkattuna millimetreinä. Kuvasta 10 selviää syöttävän pään N-liittimen asettelu. (ISO 11452-5 2002, 8–9.)



KUVA 9 90 Ω :n liuskajohto (ISO 11452-5 2002.)



KUVA 10 N-liittimen asettelu (ISO 11452-5 2002.)

4.4 Turvallisuus

Liuskajohdolla tehtäviä mittauksia suoritettaessa on otettava huomioon turvallisuuteen liittyvät asiat. Testin ollessa käynnissä kammiossa ei saa olla ihmisiä ja kammion ovet on suljettava radiotiiviisti. Ovet on pidettävä suljettuina aina testin ollessa käynnissä. Testausalueella voi esiintyä vaarallisia jännitteitä ja kenttiä, joten on huolehdittava, että vaatimukset ihmisten altistumisen rajoittamisesta radiotaajuiselle säteilylle täyttyvät. Liuskajohdon päätevastus voi kuumentua erittäin kuumaksi, joten hyvä ilmankierto on välttämätön liiallisen kuumenemisen estämiseksi. Pitkäaikaisesti isolla teholla kuormitettaessa on syytä käyttää lisäpuhallinta. Kaikki palava materiaali on pidettävä kaukana päätevastuksesta. (Schwarzbeck Mess-Elektronik; ISO 11452-5 2002, 4.)

5 ENNEN KÄYTTÖÖNOTTOA

TEMZ 5232 -liuskajohto oli hankittu Savonian EMC-laboratoriolle Schwarzbeck Mess-Elektronik:ltä Saksasta jo muutama vuosi ennen tämän opinnäytetyön aloittamista. Liuskajohdon käyttöönotto oli kuitenkin viivästynyt ja osa sen osista hävinnyt. Tässä osiossa kuvataan kaikki vaiheet ennen varsinaisia käyttöönottomittauksia.

5.1 Osien kartoitus ja hankinta

Opinnäytetyön ensimmäinen vaihe oli selvittää liuskajohdon puuttuvat osat. Osien selvitys oli aluksi hankalaa, koska laitteen manuaalista ei löytynyt osaluetteloa emmekä saaneet käsiimme myöskään räjäytyskuvia. Muutaman kuukauden mittaisen valmistajan kanssa käydyn sähköpostin vaihdon jälkeen puuttuvat osat saatiin selville ja tilaus tehtyä. Myöhemmin tilattujen osien saavuttua kuitenkin selvisi vielä yhden osan puuttuminen, mikä viivästytti hieman aikataulua.

5.2 Testauspöydän suunnittelu ja rakennus

Liuskajohtoon tilattujen osien saapumista odotellessa alkoi laitteen alle tulevan tukirakenteen suunnittelu. Tukirakennetta käytetään liuskajohdon alla testauspöytänä. Standardi ei määrittele liuskajohdolle tarkkaa korkeutta lattiasta, joten ihanteellisin korkeus testauspöydälle on sopiva työskentelykorkeus.

Kuvassa 11 näkyy rakennettu pöytätaaso ja tukijalat. Testauspöytä päädyttiin rakentamaan kahdesta MDF-levystä sekä kolmesta väliseinätolpasta. Kahden, pöytärakennelman sivuilla olevan, väliseinätolpan päät jätettiin pitkiksi, jotta pöytää on helpompi liikutella. Kolmas väliseinätolppa asetettiin pöydän lävistäjälle jäykistämään rakennetta.

Pöydän alla päädyttiin käyttämään kolmea kolmion muotoista kasaan taitettavaa tukijalkaa, jotka löytyivät EMC-laboratoriolta jo ennestään. Tämä helpottaa tilankäytöllisiä ongelmia laitetta säilytettäessä, kun liuskajohtoa varten ei tarvinnut hankkia uusia tukijalkoja, vaan päästiin hyödyntämään jo olemassa olevaa kalustoa. Tilankäytöllisistä syistä haluttiin myös pöytätaason olevan irrallaan tukijaloista. Yhtenäisen ison pöydän säilytys ja liikuttelu olisi ollut mahdotonta pienissä tiloissa.



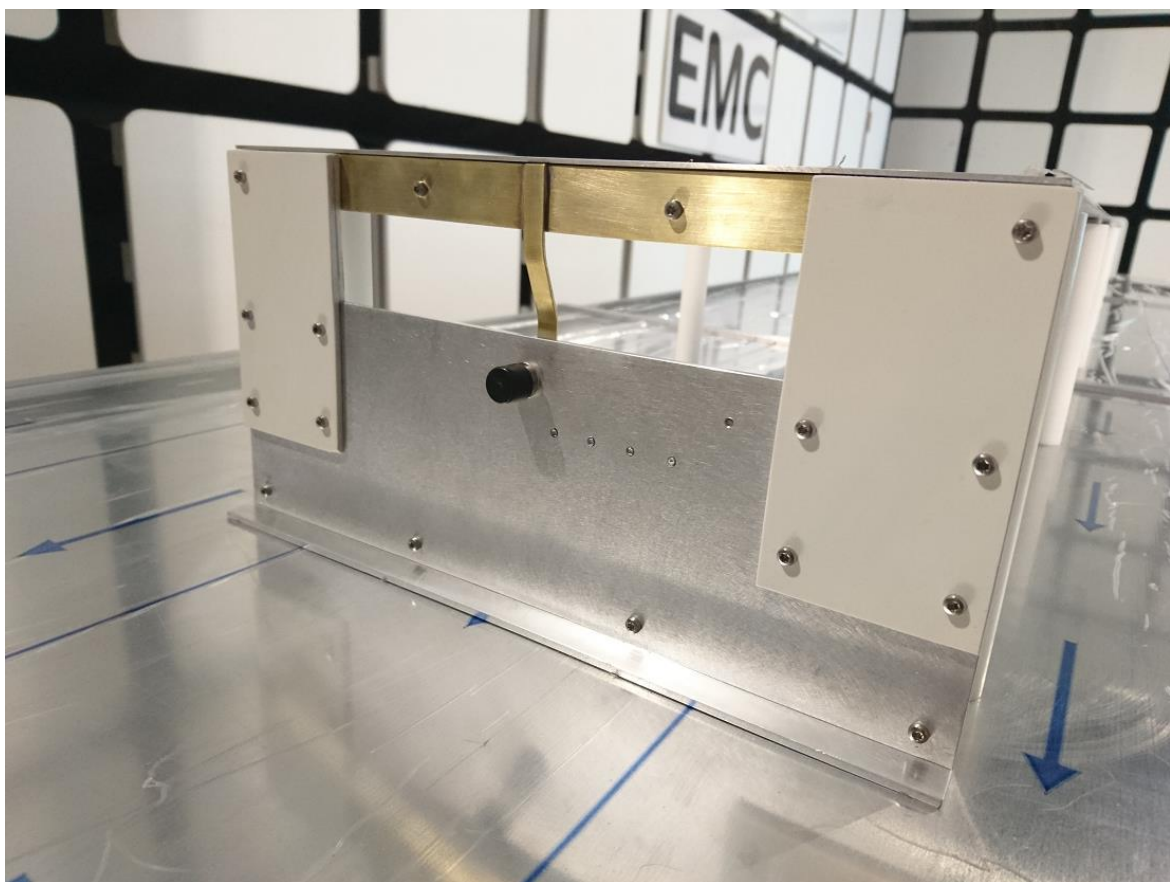
KUVA 11 Testauspöytä ja tukijalat.

5.3 Liuskajohdon kokoaminen

Testipöydän valmistuttua ja puuttuvien osien saavuttua päästiin kokoamaan itse laitetta. Kuten kohdassa 4.2 mainittiin, liuskajohto koostuu alumiinilevyistä, päätevastuksesta, syöttöpään liittimestä sekä eristäivistä muovisista tukitangoista. Muovisten tukitankojen päällä oleva alumiiniliuska on johtavaa osaa ja alla olevat levyt muodostavat maatasen. Laitteen manuaalista löytyi ohjeet liuskajohdon kokoamiseen. Kuvassa 12 näkyy liuskajohto koottuna. Kuvassa näkyvät kaikki osat lukuun ottamatta syöttöpään liitintä, joka on kuvattu kuvassa 15. Päätevastus on kuvattu tarkemmin kuviin 13 ja 14.



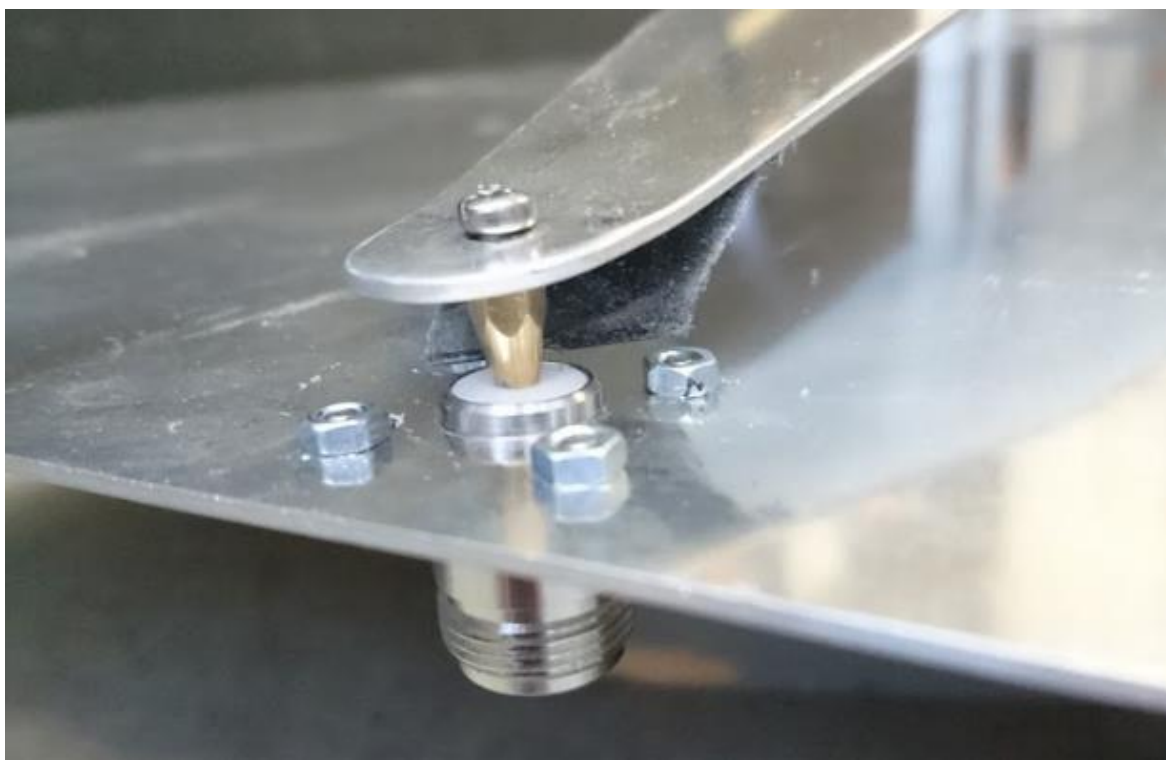
KUVA 12 Testipöydän päälle koottu liuskajohto.



KUVA 13 Päätevastus ja BNC-liitin.



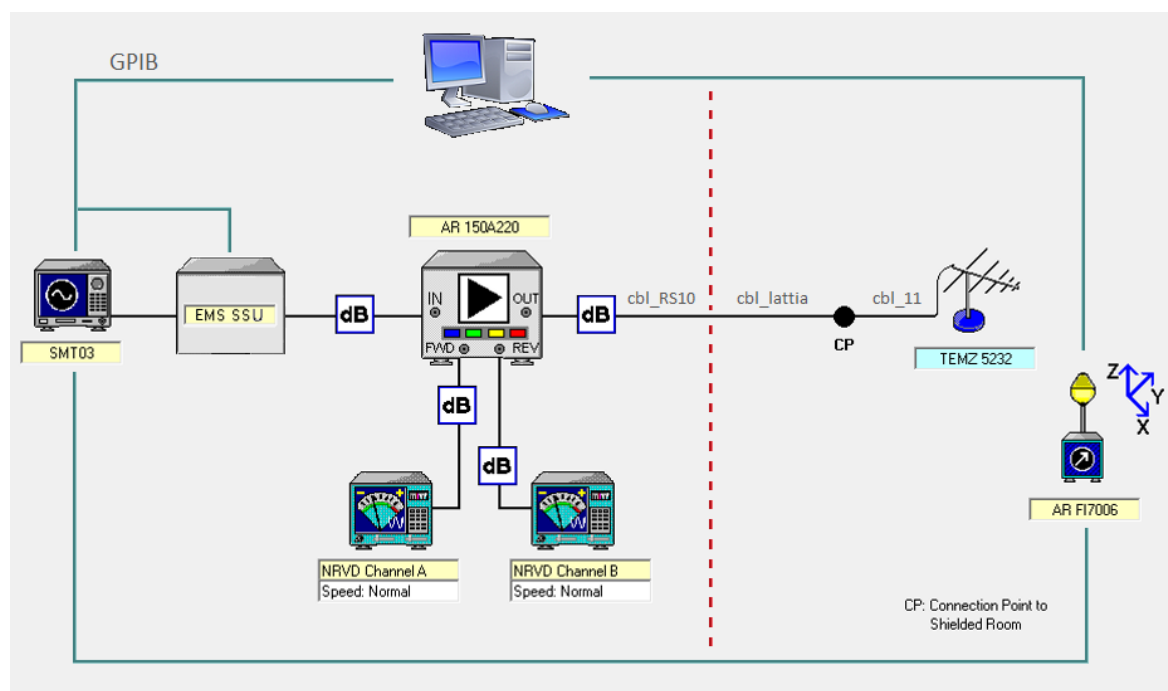
KUVA 14 Päätevastuksen takapuolella olevat vastukset.



KUVA 15 Syöttöpään N-liitin.

5.4 Signaalipolku ja laitteet

Kuvassa 16 on esitetty signaalipolku, GPIB-väylä ja mittauksissa käytetyt laitteet. Vihertävällä merkattu viiva kuvaa GPIB-väylää, jonka kautta PC ohjaa laitteita. Mustalla viivalla taas on kuvattu signaalipolku, ja punainen katkoviiva erottaa mittakammion muista tiloista. Vahvistimia oli käytössä kaksi, mutta kuvassa 16 on esitetty niistä vain toinen selkeyden vuoksi. Liuskajohdon symboliksi on merkattu antennin symboli ja selitys tälle löytyy kohdasta 5.5.



KUVA 16 Signaalipolku, GPIB-väylä ja laitteet.

Taulukkoon 1 on listattu kaikki mittauksissa käytetyt laitteet. Kuvassa 17 näkyy generaattoriräkki, jossa on suurin osa taulukon 1 ja kuvan 16 laitteista. Vahvistimet, tehomittari, signaaligeneraattori ja kytkinyksikkö sijaitsevat kaikki räkissä. Huone, jossa räkki sijaitsee, on radiokaiuttoman mittahuoneen eli kammion vieressä. Radiokaiuton kammio on varsinainen mittahuone, jossa liuskajohto, sitä syöttävä kaapeli ja kenttäanturi sijaitsevat. Lämpötila, ilmankosteus ja ilmanpaine mitataan taulukon 1 alussa näkyvillä mittareilla ennen testien aloittamista.

TAULUKKO 1 Mittauksissa käytössä olleet laitteet.

LAITE	TYYPPI	VALMISTAJA
Lämpötila- ja ilmankosteusmittari	HygroPalm HP22-A	Rotronic
Lämpötila- ja ilmankosteussensori	HC2-S	Rotronic
Ilmanpainemittari	Testo 511	Testo
Kentänvoimakkuusanturi	FL7006	Amplifier Research
Signaaligeneraattori	SMT 03	Rohde&Schwarz
Tehomittari	NRVD	Rohde&Schwarz
100 V liitosyksikkö	URV5-Z4	Rohde&Schwarz
10 V liitosyksikkö	URV5-Z2	Rohde&Schwarz
Kytkeyksikkö	EMS SSU v2.20	Orbis
RF Vahvistin	150A220	Amplifier Research
RF Vahvistin	5226RE	Ophir RF
Liuskajohto 90 Ω	TEMZ 5232	Schwarzbeck Mess-Elektronik
Ohjelmisto	EMC32	Rohde&Schwarz

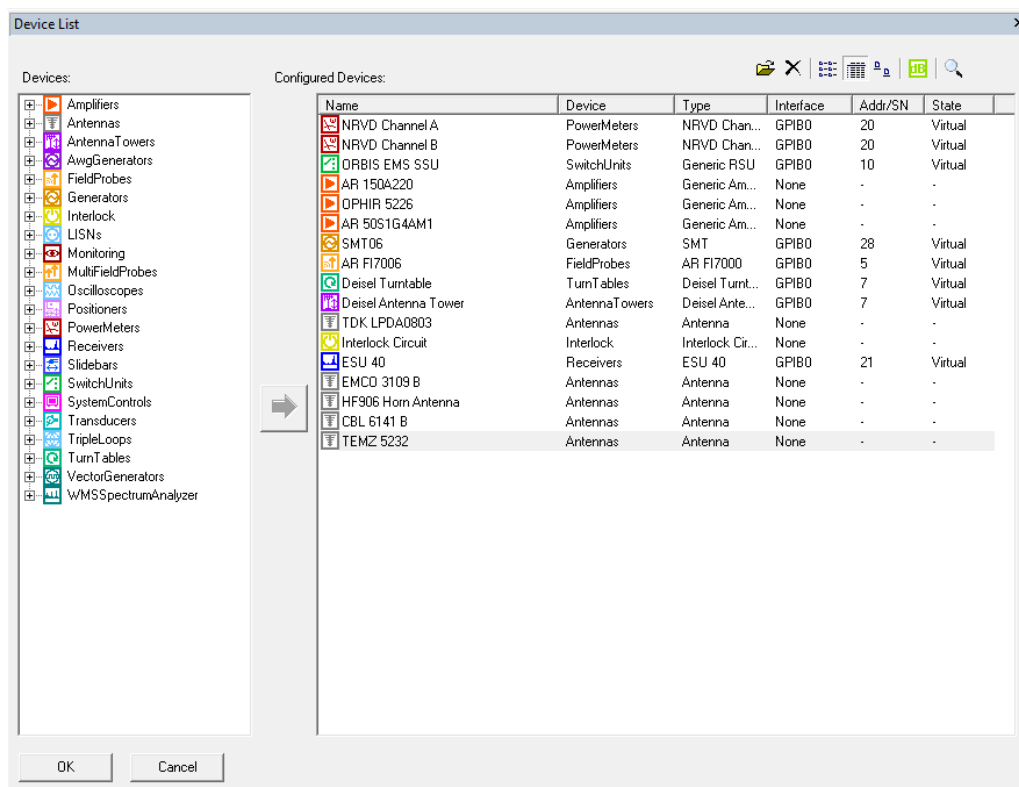


KUVA 17 Generaattoriräkki.

5.5 Ohjelmistoasetukset

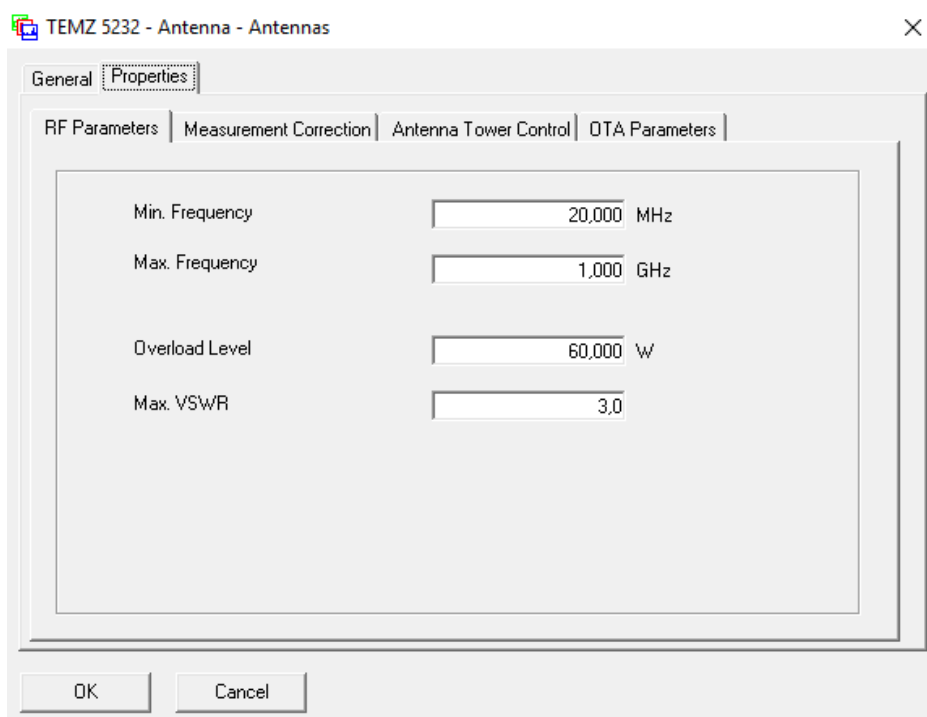
Liuskajohdon käyttöönottomittaukset suoritettiin käyttäen R&S EMC32 -ohjelmistoa. Ennen käyttöönottomittauksia täytyi ohjelmaan tehdä valmisteluja testejä varten. PC ohjaa laitteita GPIB-väylän kautta. Ensimmäisenä laiteluettelosta, joka näkyy kuvassa 18, tarkastettiin kaikkien testeissä tarvittavien laitteiden löytyvän listalta.

Samasta kuvasta 18 voidaan myös huomata, että liuskajohto (kuvassa valittuna) on määritelty antenniksi. EMC32 -ohjelmiston ohjeita selatessa huomattiin, että EMC-laboratoriolle hankitussa ohjelmistossa ei ole optiota K1, joka on tarkoitettu muun muassa liuskajohdolla tehtäviin mittauksiin. Tästä syystä mittauksissa päätettiin käyttää sovellettua tapaa, jossa liuskajohtoa käsitellään ikään kuin antennina, mutta asetuksia muokataan liuskajohdolla tehtäviin mittauksiin sopiviksi.



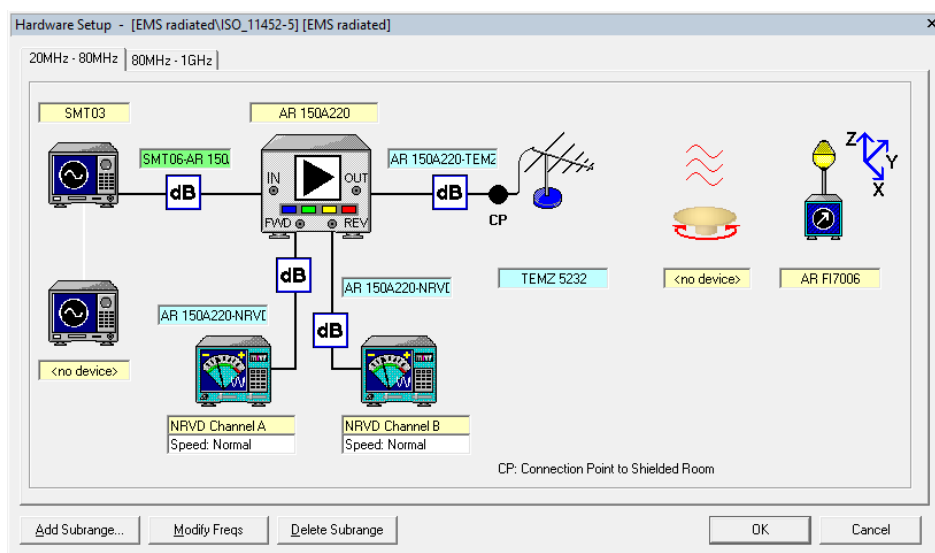
KUVA 18 Laiteluettelo.

Seuraavaksi valittiin laiteluettelon kohdasta liuskajohto TEMZ 5232, jolloin avautui kuvan 19 mukainen ikkuna. Taajuusalue, ylikuormitustaso sekä suurin sallittu VSWR-arvo tuli tässä kohtaa määrittellä. Nämä tiedot löytyvät liuskajohdon manuaalista (Schwarzbeck Mess-Elektronik). Pelkästään RF Parameters -välilehden täyttäminen riittää, sillä muita kohtia ei tarvita liuskajohtomittauksissa määrittellä.



KUVA 19 Liuskajohdolle määritettävät parametrit.

Kuvassa 20 on esitetty kaavio liuskajohtotestauksen kokoonpanosta. Taajuusalue on jaettu kahteen osaan: 20 MHz – 80 MHz ja 80 MHz – 1 GHz. Tämä johtuu siitä, että testeissä käytetään eri vahvistinta eri taajuusalueilla. Kaaviot molemmilla taajuusalueilla ovat siis muuten toistensa kaltaiset, ainoastaan vahvistin vaihtuu.



KUVA 20 Kaavio testauskokoonpanosta taajuusalueella 20 MHz - 80 MHz.

Laitteiston asetusten jälkeen mittauksille luotiin testipohjat. Kuvissa 21 ja 22 on esimerkit 60 V/m testitasolle tehdyistä kalibrointi- ja testimittauksen pohjista. Kalibrointimittaukset ajettiin kutakin testitasoa vastaavalla kentänvoimakkuudella, ja modulaatio oli kytkettynä pois päältä. Ohjelma tallentaa kunkin testitason vaatiman tehon jokaisella testitaajuudella. Näiden talletettujen arvojen pohjalta suoritetaan itse testiajot.

EMS Scan Template - [ISO_11452-5\60 Vm\ISO_11452-5_60Vm_cal] [EMS Radiated]

General Settings | Leveling Mode | Leveling Options | Options

EMC Test Standard: Commercial | Immunity Level Unit: V/m | Hardware Setup: ISO_11452-5

No	Subrange	Step	Level	Modulation	Dwell Time	Level Sweep
1	20MHz - 80MHz	5% LOG	60V/m	Modulation Off	1s	OFF: 0 dB
2	80MHz - 400MHz	5% LOG	60V/m	Modulation Off	1s	OFF: 0 dB
3	400MHz - 1GHz	2% LOG	60V/m	Modulation Off	1s	OFF: 0 dB

Frequency | Level | Device Setups | Actions

Start Frequency: 20 MHz | Stop Frequency: 80 MHz | Step Mode: LOG | Step Size: 5,000 % | Dwell Time: 1,000 s | Meas. Points: 28

Exclude Frequency Bands ...

☐ Use Frequency Table | Frequency Table: <none>

☐ Use Frequency Table only

Buttons: Delete Subrange, Add Subrange, System Monitoring, OK, Cancel

KUVA 21 Testitason 60 V/m kalibroinnin testipohja.

Varsinaiset testiajot ajetaan amplitudimodulaatio päällä, kuten nähdään kuvan 22 Modulation-sarakkeen alta. Samasta kuvasta voidaan huomata, että kolmas taajuusalue loppuu jo 800 MHz:iin eikä jatku 1 GHz:iin kalibrointiajojen testipohjan mukaan. Tämä johtuu siitä, että mittauksissa jouduttiin alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen käyttämään R&S SMT 03 -signaaligeneraattoria SMT 06 -signaaligeneraattorin sijaan. SMT 03 -signaaligeneraattorilla ei pysty aikaansaamaan pulssimodulaatiota, joka täytyisi olla päälle kytkettynä taajuusalueella 800 MHz – 1 GHz (ISO 11452-1 2015, 9). Tästä ei koitunut käyttöönottomittausvaiheessa ongelmaa, sillä kalibroinnit pystyttiin suorittamaan 1 GHz:iin asti. Käyttöönottomittauksissa tärkein mitattava taajuusalue oli 20 MHz - 220 MHz, sillä samainen väli on liuskajohdon nimellinen taajuusalue. Tämäkin seikka huomioon ottaen pulssimodulaation puuttuminen ei ollut kalibrointiajoissa olennaista.

EMS Scan Template - [ISO_11452-5\60 Vm\ISO_11452-5_60Vm_test] [EMS Radiated] (*)

General Settings | Leveling Mode | Leveling Options | Options

EMC Test Standard: Commercial | Immunity Level Unit: V/m | Hardware Setup: ISO_11452-5

No	Subrange	Step	Level	Modulation	Dwell Time	Level Sweep
1	20MHz - 80MHz	5% LOG	33.3V/m	AM: 80%; 1kHz	1s	OFF: 0 dB
2	80MHz - 400MHz	5% LOG	33.3V/m	AM: 80%; 1kHz	1s	OFF: 0 dB
3	400MHz - 800MHz	2% LOG	33.3V/m	AM: 80%; 1kHz	1s	OFF: 0 dB

Frequency | Level | Device Setups | Actions

Start Frequency: 20 MHz | Stop Frequency: 80 MHz | Step Mode: LOG | Step Size: 5,000 % | Dwell Time: 1,000 s | Meas. Points: 28

Exclude Frequency Bands ...

☐ Use Frequency Table | Frequency Table: <none>

☐ Use Frequency Table only

Buttons: Delete Subrange, Add Subrange, System Monitoring, OK, Cancel

KUVA 22 Testitason 60 V/m mittauksen testipohja.

Kuten kuvasta 21 nähdään, kalibrointimittaukset suoritettiin testitasoille 60 V/m, 100 V/m, 150 V/m ja 200 V/m. Kalibrointiajojen testitasot määräytyvät ajoneuvodirektiivin sekä standardin pohjalta. ISO 11452-5 -standardi määrittää testitasot vuonna 2002 julkaistun version sivulla 11. Standardin mukaan ensimmäinen testitaso olisi 50 V/m, mutta ajoneuvodirektiivi määrää kohdassa ”6.7.2 SE-asennelman häiriönsiedon tyyppihyväksyntärajat” häiriönsiedon testitasoksi vähintään 60 V/m. Tämän vuoksi ensimmäiseksi testitasoksi valitaan 60 V/m ja loput testitasot noudattavat standardin määrittelemiä tasoja.

Kuvasta 22 voidaan huomata, että modulaation päälläolo vaikuttaa testipohjaan määritettyyn testitasoon. Varsinaisia testiajoja suoritettaessa ei määritetä immuteettitasoksi samoja testitasoja kuin kalibrointimittauksissa, sillä on otettava huomioon amplitudimodulaation vaikutus. Tämän vuoksi kalibrointimittauksissa määritetyt testitasojen arvot jaetaan luvulla 1,8, jolloin saadaan oikeat immuteettitasot määriteltyä varsinaisten mittausten pohjiin. Luku 1,8 saadaan selvitettyä standardin ISO 11452-1 avulla alla esitetyllä tavalla.

Kaava 15

$$P_{test} = P_{cal} \left(\frac{L_{test}}{L_{cal}} \right)^k, \quad (15)$$

jossa P_{test} [W] on kalibrointiin perustuva testiteho, P_{cal} [W] on kalibroitu teho, joka vaaditaan testitasojen saavuttamiseksi, L_{test} [V/m] on testitaso, L_{cal} [V/m] on kalibroitu testitaso ja $k=2$ (ISO 11452-1 2015, 13). Mittauksissa testitasoina ei käytetä kuitenkaan tehoja vaan kentänvoimakkuuksia, joten on selvitettävä tehojen suhteen kautta jakaja, jolla kalibroinneissa käytettävä testitaso on jaettava, jotta tehojen oikea suhde toteutuu. Esitellään vielä kaava 16

$$\frac{P_{CWpm}}{P_{CW}} = \left(\frac{1}{1+m} \right)^2, \quad (16)$$

jossa $P_{CWpm} = P_{cal}$ ja $P_{CW} = P_{test}$ ja $m=0,8$ (80 % amplitudimodulaatio) (ISO 11452-1 2015, 29). Näitä kahta kaavaa 15 ja 16 hyödyntämällä saadaan selvitettyä, että 1,8 on oikea jakaja, jotta tehojen suhde pysyy oikeana. Alla on esitetty perustelu tälle. Nyt

$$L_{test} = 60 \text{ V/m}$$

$$L_{cal} = 60 \text{ V/m} / 1,8 = 33,33... \text{ V/m}$$

$$k = 2$$

ja päätetään, että $P_{cal} = 2 \text{ W}$ (tällä ei ole merkitystä, koska tarkastellaan vain tehojen suhdetta).

Sijoitetaan arvot kaavaan 15 ja saadaan tulokseksi $P_{test} = 6,48 \text{ W}$. Jaetaan nyt $P_{cal} = 2 \text{ W}$ tuloksella $P_{test} = 6,48 \text{ W}$ ja saadaan suhdeluku 0,309. Kaavan 16 oikea puoli antaa myös tulokseksi 0,309 suhdeluvun. Tämä osoittaa, että oli oikein jakaa L_{cal} luvulla 1,8, koska silloin tehojen suhde pysyy standardin vaatimana, jolloin amplitudimodulaation vaikutus on otettu oikealla tavalla huomioon.

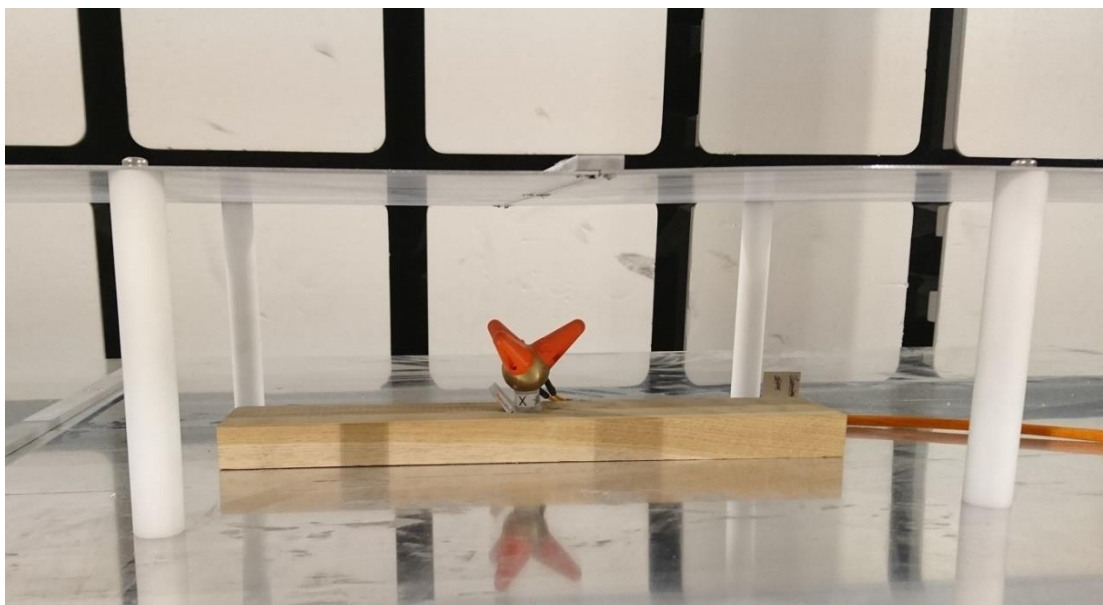
6 KÄYTTÖÖNOTTOMITTAUKSET

Mittauskaluston ja -ohjelmiston valmistelujen jälkeen päästiin lopulta suorittamaan liuskajohdolle testiajoja. Tässä osiossa esitetään koejärjestelyt, tulokset ja niiden tulkinta, johtopäätökset sekä mahdolliset jatkotoimenpiteet.

6.1 Koejärjestelyt

Ohjelmistoon liittyvät koejärjestelyt on kuvattu jo edellisessä osiossa 5.5. Tässä kohtaa esitetään varsinaisessa mittahuoneessa eli radiokaiuttomassa kammiossa olevien laitteiden asettelu. Muiden laitteiden asettelu näkyy kohdan 5.4 kuvista.

Kuvassa 23 on esitetty kentänvoimakkuusanturin asettelu liuskajohdon johtavan tason alle. Mittauksissa oli käytössä AR FL7006 -kentänvoimakkuusanturi, joka mittaa kentänvoimakkuuden suuruutta. Anturi tulee asetella mahdollisimman keskelle liuskajohtoa johtavan tason alapuolelle (ISO 11452-5 2002, 5). Kuvasta 24 näkyy liuskajohdon ja kentänvoimakkuusanturin asettelu radiokaiuttomassa mittahuoneessa. Mittaukset suoritettiin aluksi ilman kentänvoimakkuusanturin alle asetettua johtamatonta alustaa (puupala). Lisäksi anturi oli ylösalaisin kuvaan 23 nähden. Standardin tarkemmalla tutkimisella kuitenkin selvisi, että kentänvoimakkuusanturin on oltava johtamattoman alustan päällä ja keskellä myös korkeussuunnassa maatasen ja johtavan liuskan välissä. Mittaukset suoritettiin uudestaan standardin määrittämällä tavalla, mutta muutos kentänvoimakkuusanturin asettelussa ei muuttanut tuloksia merkittävästi.



KUVA 23 Kentänvoimakkuusanturin asettelu.

FL7006 lähettää tiedot kentänvoimakkuudesta PC:lle, ja PC lähettää mitatun arvon signaaligeneraattorille. Signaaligeneraattori pyrkii säätämään kentänvoimakkuuden tason vastaamaan määriteltyä arvoa. Esimerkiksi jos kentänvoimakkuus on pienempi kuin määritetty testitaso, alkaa signaaligeneraattori syöttämään enemmän tehoa, jotta pystytään ylläpitämään vaadittu kentänvoimakkuus.

Mittausten tarkoituksena on säilyttää vaadittu kentänvoimakkuuden taso mahdollisimman tasaisena. Mittauksissa molemmat vahvistimet on kytketty toimimaan koko ajan täydellä teholla. EMS SSU - kytkinyksikkö ohjaa, kumpiko vahvistimista on milloinkin toiminnassa. Ohjelmistoasetuksissa on määritetty kummallekin vahvistimelle taajuusalue, jolla ne toimivat.

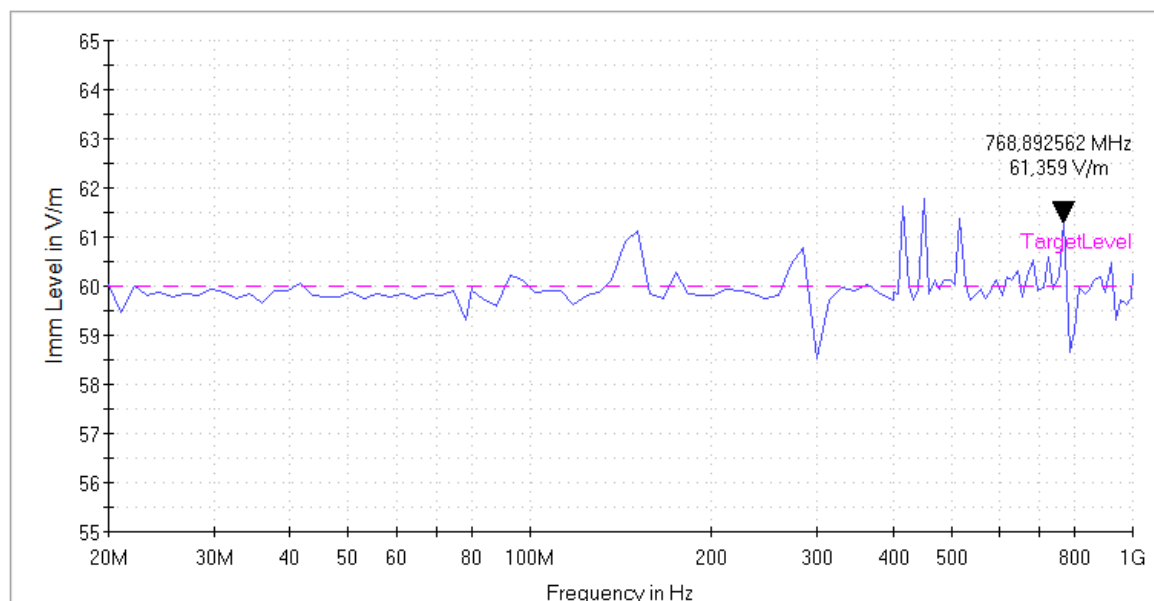


KUVA 24 Liuskajohdon ja kentänvoimakkuusanturin asettelu radiokaiuttomassa mittahuoneessa.

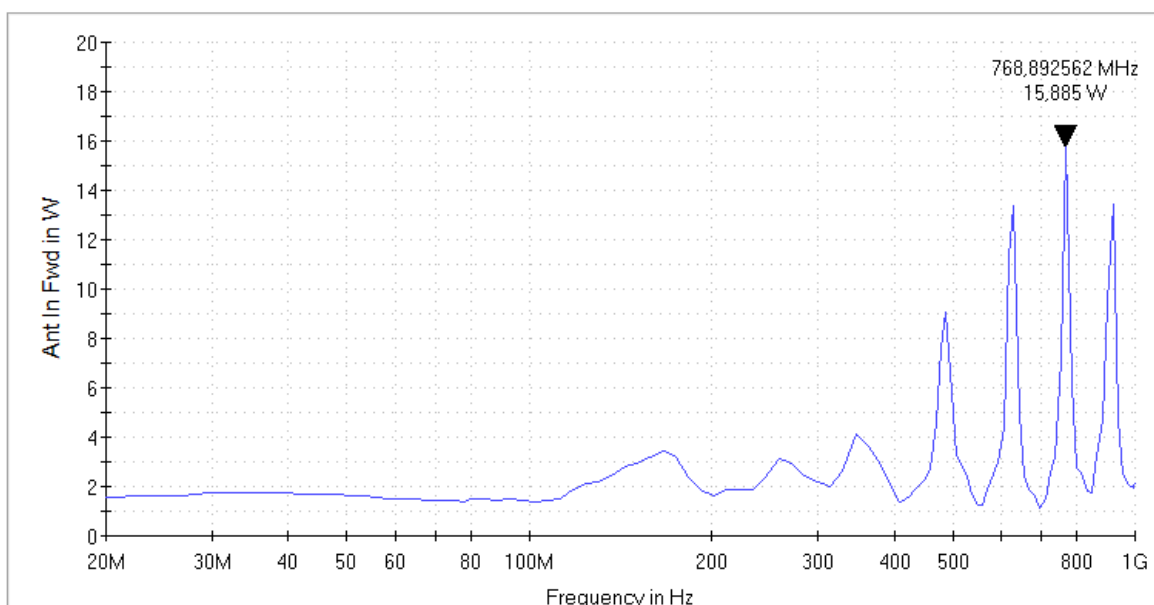
6.2 Tulokset ja niiden käsittely

Käyttöönottomittausten aikana suoritettiin mittauksia monella eri immunitaustasolla ennen varsinaisia kalibrointiajoja. Tässä osiossa esitellään vain lopulliset kalibrointimittausten tulokset jokaisella testitasolla. Tuloksista esitetään immunitaustason sekä tehon kehitys. Testien aikana tarkkailtiin myös muun muassa sitä, että vahvistin pysyy lineaarisella alueella eikä saturei. Saturaatiota ei havaittu mittausten aikana.

6.2.1 60 V/m tason kalibroitimittaus



KUVIO 1 60 V/m tason kalibroitimittauksen immunitaattitasen kehitys.

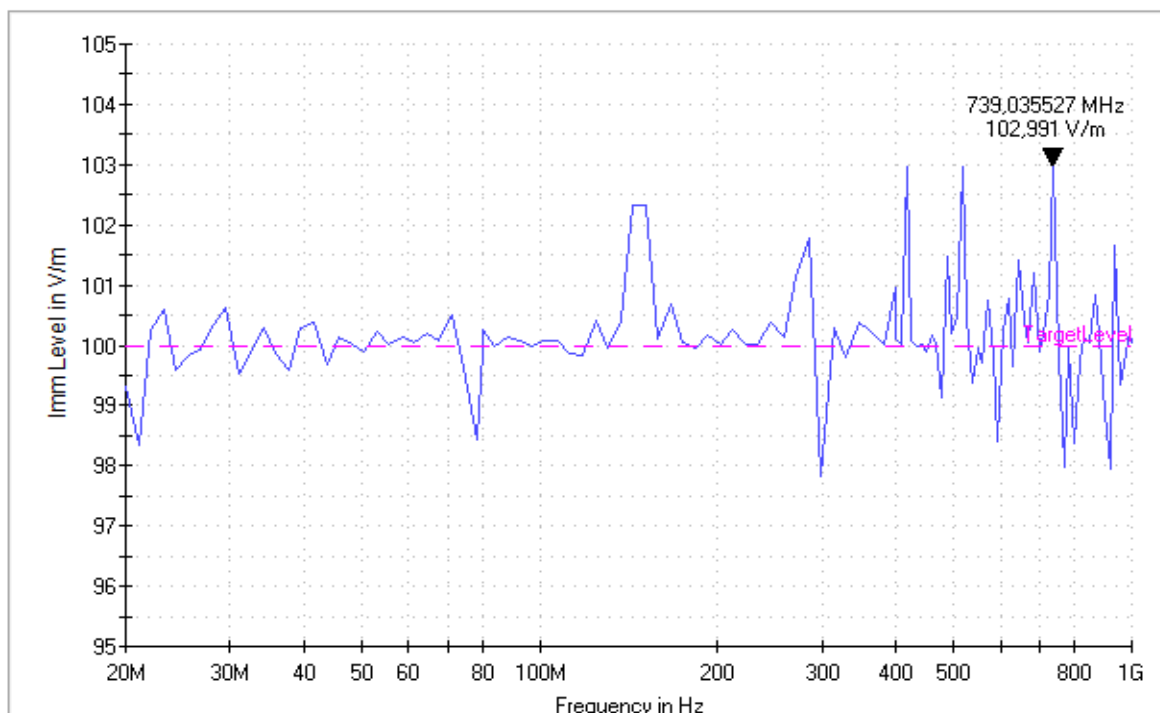


KUVIO 2 60 V/m tason kalibroitimittauksen tehon kehitys.

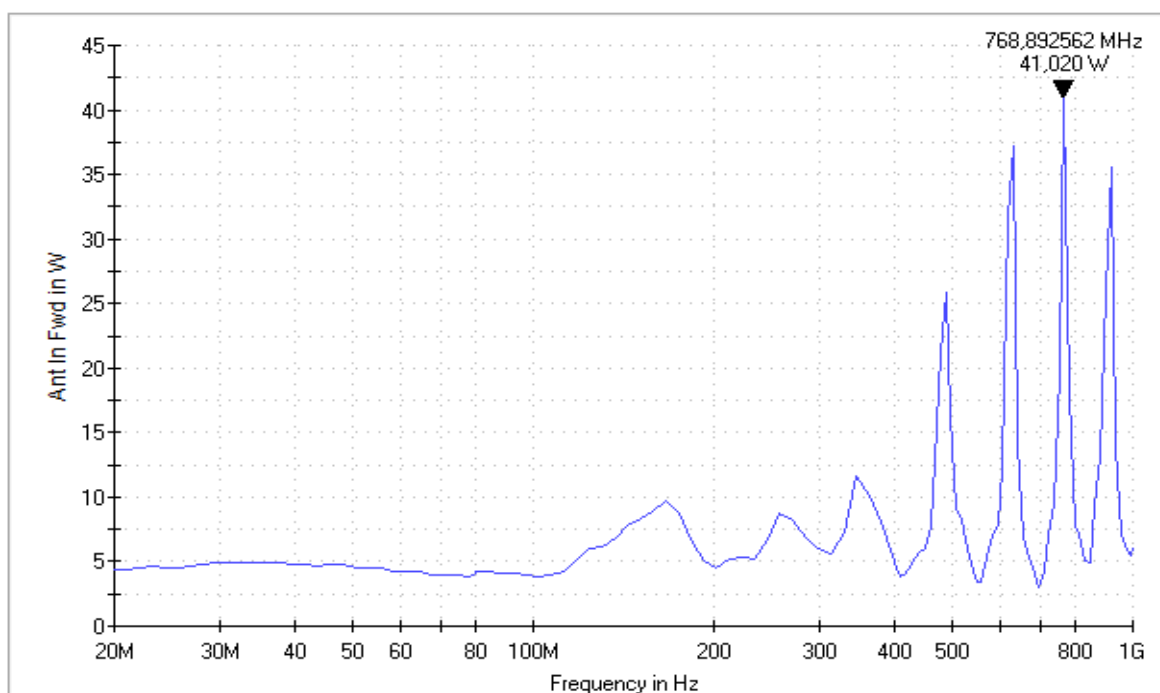
Oleellista tulosten tarkastelussa on immunitaattitasen tasaisuuden tarkkailu. Immunitaattitasen täytyisi säilyä tasaisena, jotta liuskajohtoa voidaan hyödyntää asiakastesteissä. Immunitaattitasen lisäksi tarkkaillaan tarvittavaa tehoa kunkin immunitaattitasen saavuttamiseksi.

Kuviossa 1 on kuvattu immunitaattitasen vaihtelut 60 V/m tason kalibroitimittauksen aikana. Kenttä pysyy melko tasaisena koko taajuusalueella. 220 MHz:n jälkeen heiluntaa tapahtuu hieman alempia taajuuksia enemmän. Kuviossa 2 on kuvattu tehon kehitys. 220 MHz:n jälkeen teho alkaa heilahdella enemmän ja tekee piikkejä loppupään taajuuksia kohden mentäessä.

6.2.2 100 V/m tason kalibrointimittaus



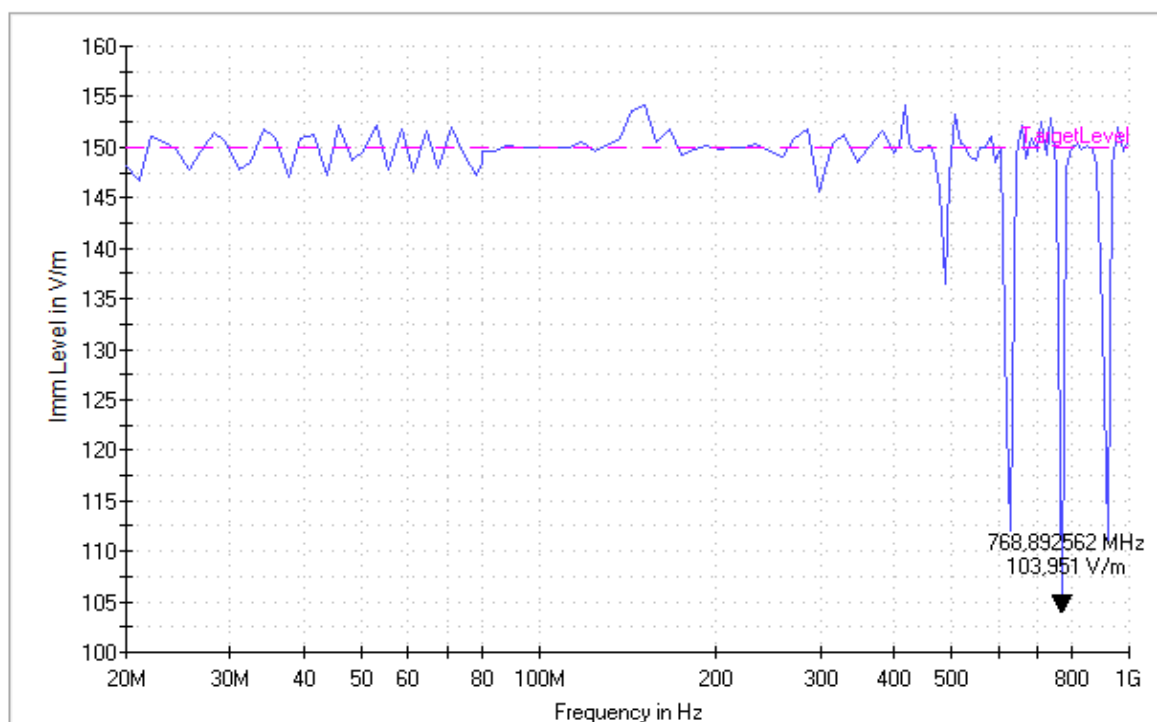
KUVIO 3 100 V/m tason kalibrointimittauksen immunitaattitaso kehitys.



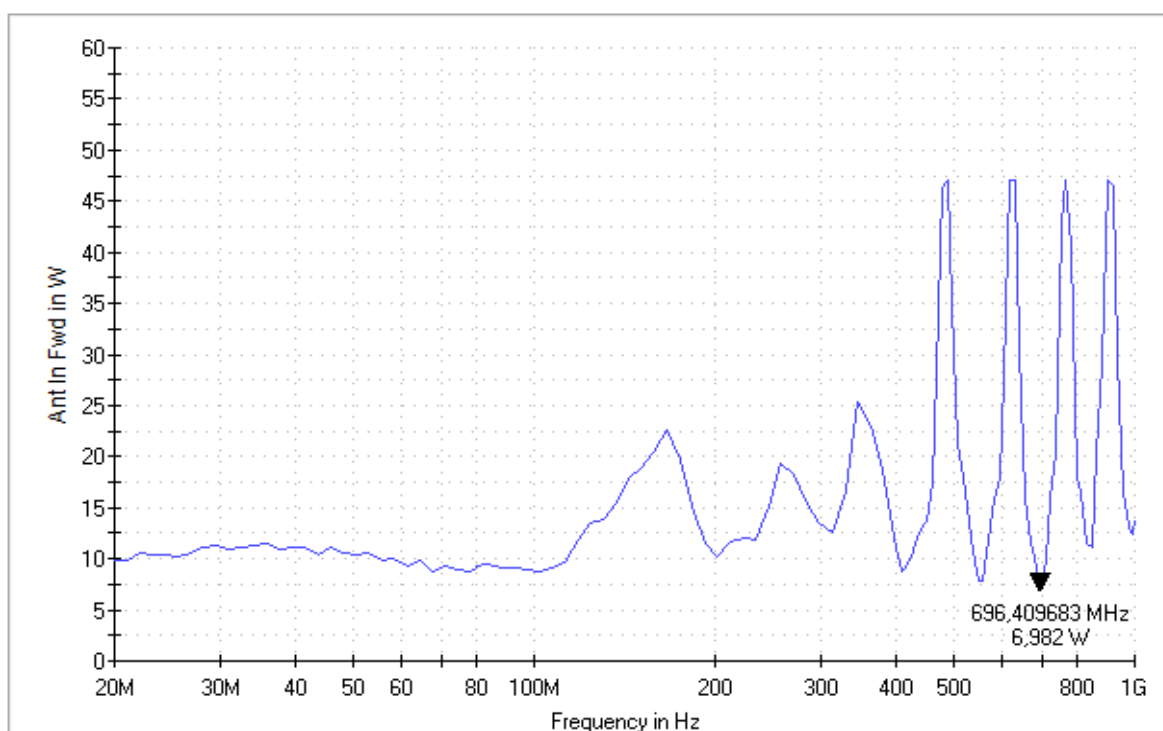
KUVIO 4 100 V/m tason kalibrointimittauksen tehon kehitys.

Kuviossa 3 on kuvattu 100 V/m kalibrointimittauksen immunitaattitaso kehitys. Testitasolle 100 V/m siirryttäessä huomataan, että immunitaattitaso alkaa heilahtella aikaisempaa enemmän. Silti heilahtelu on vielä maltillista koko taajuusalueella. Kuviosta 4 huomataan, että suurin esiintynyt tehopiikki 41 W on huomattavasti suurempi kuin aiemmalla testitasolla esiintynyt 15,9 W:n tehopiikki. Tästäkin huolimatta pysytään alle 60 W:ssa, jonka verran päätevastus kestää tehoa.

6.2.3 150 V/m tason kalibrointimittaus



KUVIO 5 150 V/m tason kalibrointimittauksen immuuteettitason kehitys.

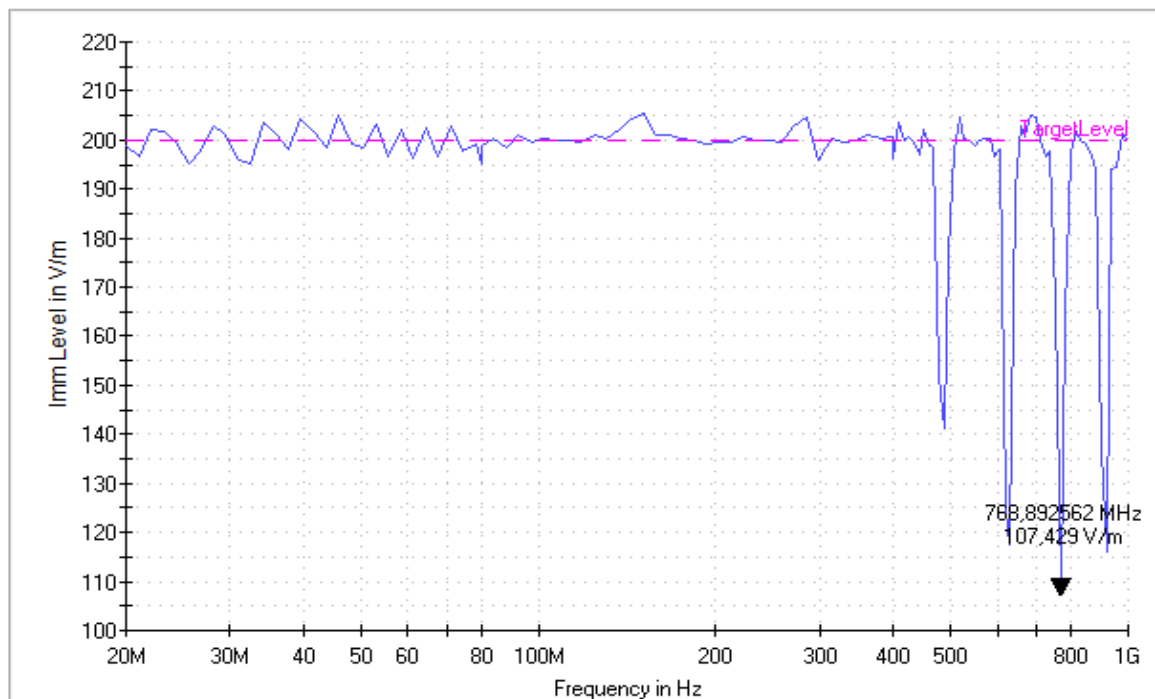


KUVIO 6 150 V/m tason kalibrointimittauksen tehon kehitys.

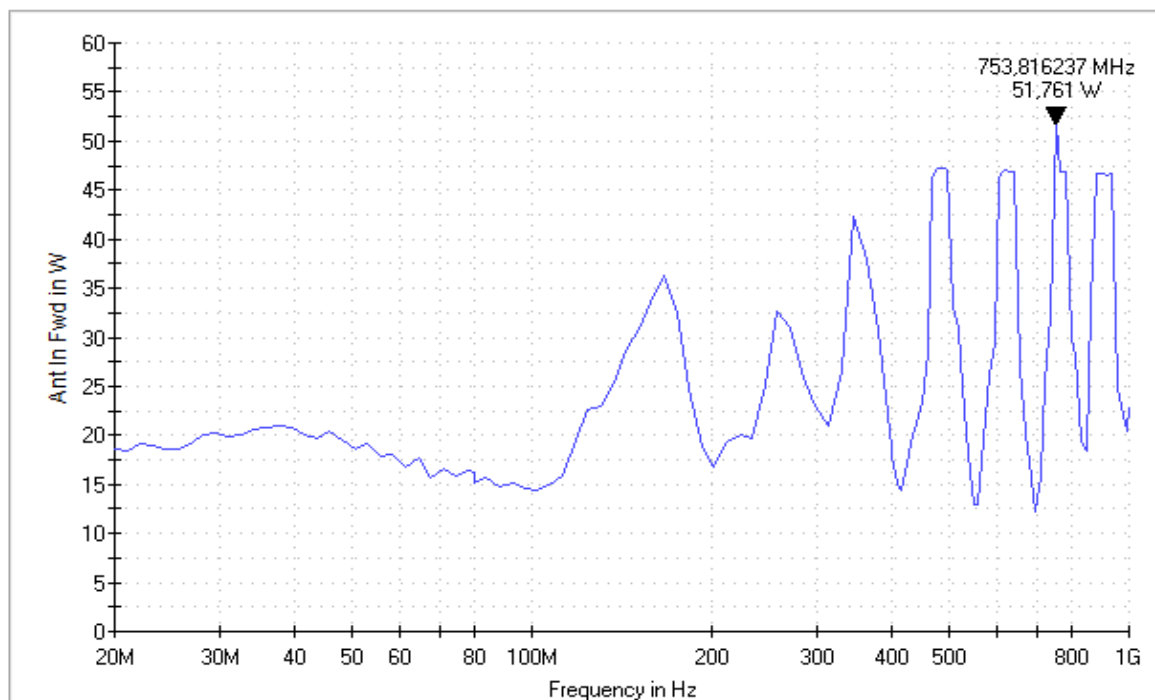
Kuviossa 5 on kuvattu 150 V/m kalibrointimittauksen immuuteettitason kehitys. 150 V/m testitasolla immuuteettitasossa alkaa näkyä suurempaa vaihtelua jo pienemmillä taajuuksilla. Tällä testitasolla huomataan selvä ero kahteen aiempaan testitasoon verrattuna, sillä isompiin taajuuksiin liikuttaessa alkaa tulla suurta kentänvoimakkuuden heittelyä. Vaihtelu pysyy maltillisena 400 MHz:iin asti, minkä

jälkeen ei pystytä enää yhtäjaksoisesti saavuttamaan tavoitetasoa. Kuviosta 6 nähdään, että tehonrajoitus, joka mittausten alussa on määritetty, alkaa toimia. Koko taajuusalueen ajan pysytään kuitenkin yli 100 V/m kentänvoimakkuuksilla.

6.2.4 200 V/m tason kalibrointimittaus



KUVIO 7 200 V/m tason kalibrointimittauksen immunitaattitason kehitys.



KUVIO 8 200 V/m tason kalibrointimittauksen tehon kehitys.

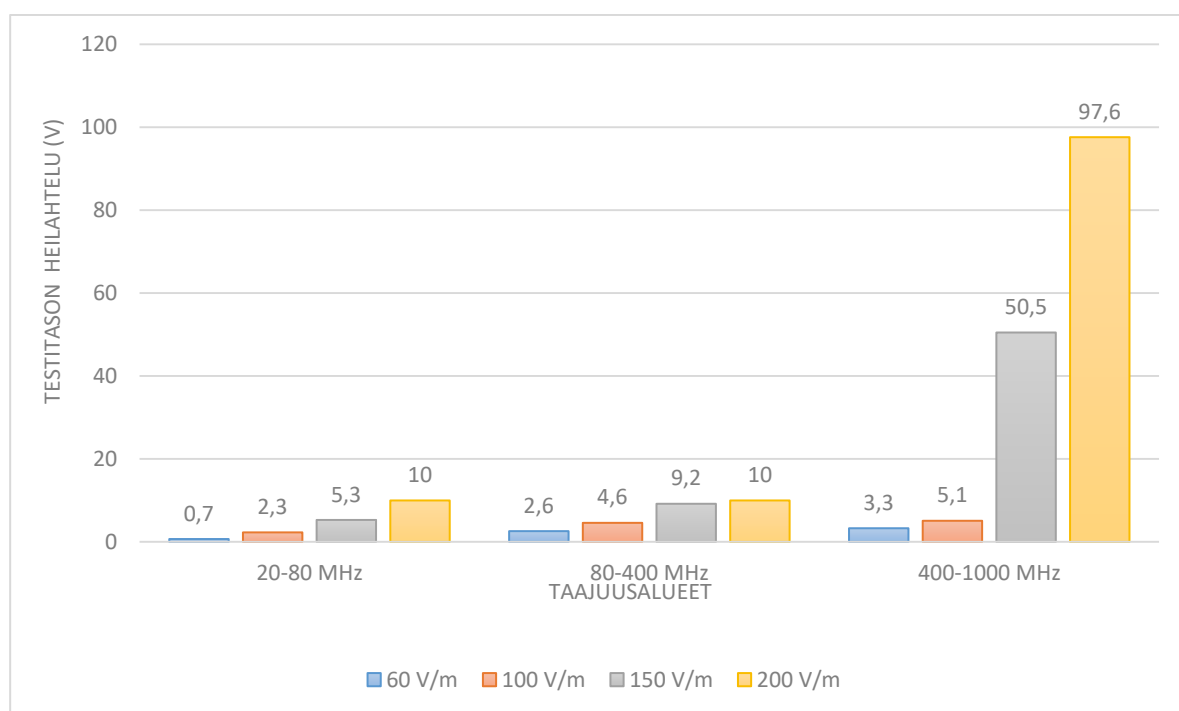
Kuviossa 7 on kuvattu 200 V/m kalibrointimittauksen immunitaattitason kehitys. 200 V/m testitason tulokset mukailevat pitkälti edellisen testitason tuloksia. Tällä kertaa kuitenkin testitason ollessa 200

V/m alin 107,4 V/m kentän voimakkuus jää vain puoleen tavoitellusta. Samoin kuin edellisessä kohdassa, alkaa heiluntaa tapahtua 400 – 1000 MHz:in taajuusalueella. Tästä voidaan päätellä, että mitä isompia kentänvoimakkuuksia halutaan, sitä epätasaisempaa kenttää saadaan erityisesti korkeammilla taajuuksilla. Kuviosta 8 nähdään tehon noudattavan aiemman kohdan 6.2.3 kaavaa.

6.2.5 Tulosten koonti

Taulukkoon 2 on koottu immunitetti- eli testitason heilahteluvälit kaikilla kolmella taajuusalueella erikseen. Jokainen testitaso on eritelty omanvärisinään palkkeina. Heilahteluväli kuvaa tietyllä taajuusalueella suurimman esiintyneen kentänvoimakkuuden ja pienimmän esiintyneen kentänvoimakkuuden erotusta. Taulukosta voidaan huomata, että taajuusalueella 20 MHz – 400 MHz pysytään hyvin tasaisissa kentissä kaikilla testitasoilla samoin kuin taajuusalueella 400 MHz – 1 GHz testitasoilla 60 V/m ja 100 V/m. Taajuusalue 400 MHz – 1 GHz tuottaa suuria ongelmia testitasoilla 150 V/m ja 200 V/m.

TAULUKKO 2 Testitason heilahteluväli kullakin taajuusalueella.



6.3 Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet

Kuten aiemmin kohdassa 5.5 mainittiin, 20 MHz – 220 MHz on liuskajohdon nimellinen taajuusalue ja alue, jolla se pystyy muodostamaan TEM-aaltoja. Kyseinen taajuusalue onkin liuskajohdon optimaalisin toimintataajuus, jolloin se pystyy säilyttämään kentänvoimakkuuden tasaisena. Tämä taajuusalue oli tärkein myös työn toimeksiantajan kannalta. Asiakastesteissä testitason täytyy läpi testin pysyä riittävän lähellä asetettua testitasoa. Tulosten tarkastelun jälkeen voidaan todeta, että tämä tavoite toteutuu kaikilla testitasoilla taajuusalueella 20 MHz – 400 MHz ja lisäksi testitasoilla 60 V/m ja 100 V/m taajuusalueella 400 MHz – 1 GHz.

Edellisessä kohdassa 6.2.5 todettiin taajuusalueen 400 MHz – 1 GHz tuottavan suuria ongelmia testitasoilla 150 V/m ja 200 V/m. Kyseisellä taajuusalueella ei pystytty suorittamaan kahden korkeimman testitason asiakastestejä muuten kuin tuotekehitysmielessä. Tästäkin havainnosta on hyötyä, sillä EMC-laboratoriolla suoritetaan paljon myös tuotekehitystestejä.

Aiemmin on mainittu liuskajohdolla tehtävien immunitetitestien olevan antennilla mitattavien testien kaltaisia. Tämä pitää paikkansa, mutta testien välillä on myös joitakin huomattavia eroja. Yksi näistä eroista on se, että liuskajohdolla pystytään aikaansaamaan kymmenkertaisia kentänvoimakkuuksia verrattuna antennilla luotuihin kenttiin. Tämän vuoksi liuskajohto soveltuu nimenomaan ajoneuvoympäristöön. Lisäksi liuskajohdolla tehtävissä testeissä tehot pysyvät melko matalina siitakin huolimatta, että kentät ovat suuria.

Toisaalta liuskajohto on hyvin taajuusrajoitteinen fysikaalisista ominaisuuksistaan johtuen. Liuskajohdon toimintataajuus loppuu 1 GHz:iin, kun taas antennin vastaava on paljon laajempi ja jatkuu jopa 18 GHz:iin asti. Antennilla on hankala saada kenttiä pienillä taajuuksilla, sillä antennilla tehtävät testit vaativat matalilla taajuuksilla isoja tehoja vahvistimesta. Liuskajohdolla tehtäviin mittauksiin tarvittava kalusto on kustannuksiltaan huomattavasti pienempi verrattuna antennilla tehtyihin mittauksiin, sillä liuskajohto ei vaadi yhtä suuria tehoja vahvistimesta. Liuskajohto pärjää pienillä taajuuksilla hyvin pienillä tehoilla ja sen optimaalisin toimintataajuus on 20 MHz – 220 MHz. Tämä voidaan huomata myös käyttöönottomittausten tuloksista.

Kuten kohdassa 5.5 todettiin, Savonian EMC-laboratoriolle hankitusta EMC32 -ohjelmasta puuttui K1-optio, joka on tarkoitettu muun muassa liuskajohtotestaukseen. Tämän vuoksi käyttöönottomittaukset suoritettiin muokaten antennilla tehtävien mittausten pohjaa liuskajohtotestiin sopivaksi. Tullevaisuudessa tulisi punnita K1-option hankkimisen tarpeellisuutta. Ohjelmiston valmistajalta saatujen tietojen ja ohjelmiston manuaalin perusteella K1-option käytön välttämättömyys liuskajohtomittauksissa jäi vielä epäselväksi. Ilman K1-optiota ei saada kaikkia toimintoja mittausten aikana käyttöön, mutta näiden toimintojen välttämättömyys ei saatavilla olevasta tiedosta selvinnyt. Tässä olisi siis vielä selvitettävää jatkotoimenpiteenä.

7 DOKUMENTOINTI

Käyttöönottomittausten jälkeen työstä laadittiin EMC-laboratorion vaatimat dokumentit, jotka olivat tulospohja, raporttipohja ja menetelmäohje. Kaikki dokumentit luotiin hyödyntäen EMC-laboratorion vanhoja pohjia, jotta ne noudattaisivat muiden dokumenttien linjaa. Laaditut dokumentit luovutettiin ainoastaan tilaajalle, eikä niitä julkaista tämän opinnäytetyön liitteinä. Tässä osiossa on kuitenkin esitetty lyhyt kuvaus jokaisesta laaditusta dokumentista.

Tulospohja on testien aikana käytettävä pohja tulosten merkitsemiseen. Pohja ohjailee mittausten kulkua ja varmistaa, että testaaja muistaa ottaa huomioon kaikki testin kannalta oleelliset asiat. Raporttipohja sen sijaan toimii pohjana mittausten raporttoimisessa asiakkaalle ja se täytetään tulospohjan avulla. Raporttipohja kertoo tiiviisti kaikki testin kannalta oleelliset asiat ja mittausten lopputuloksen.

Yllä mainittujen pohjien lisäksi yksi tärkeä osa opinnäytetyötä oli luoda menetelmäohje 150 mm:n liuskajohdolla suoritettavan ajoneuvojen sähkö- ja / tai elektroniikka-asennelmien sähkömagneettisten häiriöiden siedon testausmenetelmästä. Mittausten toistettavuuden kannalta menetelmäohjeen luominen on välttämätöntä. Testaajan pitäisi pystyä suorittamaan testi luettuaan menetelmäohjeen sekä testiin liittyvät standardit. Tämän vuoksi on tärkeää, että menetelmäohje on tarpeeksi yksityiskohtainen ja aukoton ohje mittauksen suorittamiseen.

8 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli saattaa Savonian EMC-laboratoriolle aiemmin hankittu liuskajohtoniminen laite toimintakuntoon sekä suorittaa laitteelle käyttöönottomittaukset. Lisäksi työstä tuli laatia EMC-laboratorion vaatimat dokumentit eli tulospohja, raporttipohja sekä menetelmäohje. Menetelmäohjeeseen tuli kuvata tarkasti mittauksissa käytetty menetelmä mittausten toistettavuuden takaamiseksi tulevaisuudessa.

Teoriaosuudessa edettiin taustalla vaikuttavista fysikaalisista ilmiöistä EMC-testauksen maailmaan ja lopulta TEMZ 5232 -liuskajohdon rakenteeseen, ominaisuuksiin ja toimintaan. Fysikaalisten ilmiöiden avaaminen aloitettiin perusasioista, sillä niiden ymmärtäminen on välttämätöntä laitteen toiminnan ja mittausten ymmärtämiseksi. Käytännön osuudessa käytiin läpi kaikki vaiheet puuttuvien osien selvittämisestä käyttöönottomittauksiin ja dokumentointiin. Käyttöönottomittaukset olivat opinnäytetyön kiinnostavin vaihe, mutta ennen niihin pääsemistä oli monta työvaihetta, ennen kuin laite saatiin toimintakuntoon.

Käyttöönottomittauksia suoritettaessa oli tavoitteena selvittää, kuinka tasaista kentänvoimakkuutta liuskajohdolla saadaan muodostettua kullakin toimintataajuudella. Toisaalta haluttiin myös selvittää, mikä on suurin kentänvoimakkuus, joka liuskajohdolla saadaan muodostettua. Taajuusalue 20 MHz – 220 MHz oli työn toimeksiantajan kannalta tärkein, sillä se on myös liuskajohdon nimellinen taajuusalue.

Käyttöönottomittausten tuloksista selvisi, että asiakastestejä pystytään suorittamaan taajuusalueella 20 MHz – 400 MHz kaikilla testitasoilla ja taajuusalueella 400 MHz – 1 GHz testitasoilla 60 V/m ja 100 V/m. Taajuusalue 400 MHz – 1 GHz aiheutti suuria ongelmia testitasoille 150 V/m ja 200 V/m. Isoilla taajuuksilla ja korkeilla testitasoilla ilmenneet ongelmat eivät kuitenkaan haittaa, sillä näitäkin voidaan hyödyntää tuotekehitystesteissä, samoin kuin liuskajohdosta lähteviä suurimpia kentänvoimakkuuksia.

Opinnäytetyölle asetetut tavoitteet toteutuivat, kun laite saatiin käyttöönotettua aikataulun puitteissa. Käyttöönottomittausten aikana saatiin vastauksia työn toimeksiantajan kannalta olennaisiin kysymyksiin. Lisäksi toimeksiantajan vaatimat dokumentit saatiin tehtyä ja luovutettua. Toimeksiantaja pääsee hyödyntämään laitetta asiakastesteissä tulevaisuudessa.

Itselleni opinnäytetyön aihe oli kiinnostava, mutta aluksi melko haastava. Aiemmin suorittamastani harjoittelusta EMC-laboratoriolla oli kuitenkin apua opinnäytetyön tekemisessä. Lisäksi sain työn aikana paljon hyviä neuvoja ja opastusta koko EMC-laboratorion tiimiltä ja opin valtavasti uusia asioita. Uskon tämän opinnäytetyön antavan minulle hyvän ponnahduslautan työelämään.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

- EMC Fastpass.** [Online] [Viitattu: 10. 4. 2018.] Saatavilla: <https://emcfastpass.com/>.
- Franciscus Jozua van Dam. 2011.** A Stripline Antenna for Radiated Immunity Testing. *University of Twente*. [Online] 2011. [Viitattu: 5. 4. 2018.] Saatavilla: http://essay.utwente.nl/61201/1/Stripline-Frank-20111027_14u45-v0073-Final_PDF3.pdf.
- Haarto, Antti. 2014.** Turku AMK. [Online] 2014. [Viitattu: 4. 4. 2018.] Saatavilla: http://fysiikka.turkuamk.fi/fysiikka/SahMag/2_3_1_SM_magnetismi.pdf.
- Honkanen, Harri.** Kajaanin AMK. [Online] [Viitattu: 9. 4. 2018.] Saatavilla: <http://docplayer.fi/12526429-Sahkomagneettinen-kytkeytyminen.html>.
- Häkkinen, Esa; Fallström, Kim; Haapalinna, Atte; Kärhä, Petri. Espoo 1999.** Häiriöt mittauksissa. *Teknillinen korkeakoulu*. [Online] Espoo 1999. [Viitattu: 5. 4. 2018.] Saatavilla: <http://metrology.hut.fi/courses/s108-180/haimit.pdf>.
- International Organization for Standardization. 2015.** ISO 11452-1. *Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 1: General principles and terminology*. 2015.
- , **2002.** ISO 11452-5. *Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 5: Stripline*. 2002.
- Jokela, Kari. 2006.** STUK. *Biosähkömagneetiikan fysikaalisia perusteita*. [Online] 2006. [Viitattu: 3. 4. 2018.] Saatavilla: https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_2.pdf/0b4cab0e-026b-4f36-a632-4f8f0efbe05d.
- Kajaanin AMK.** Mittaustekniikan perusteet. *Sähkömagneettiset häiriöt*. [Online] [Viitattu: 9. 4. 2018.] Saatavilla: <http://www.kamk.fi/loader.aspx?id=fb4a7a77-17ce-4455-bfde-ed9dfe632b64>.
- Komission direktiivi 2004/104/EY. 2004.** Moottoriajoneuvojen radiohäiriöitä (sähkömagneettista yhteensopivuutta) koskeva neuvoston direktiivi. 2004.
- Lehto, Heikki; Havukainen, Raimo; Leskinen, Janna; Luoma, Tapani. 2007.** *Fysiikka 7 Sähkömagnetismi*. Helsinki : Tammi, 2007.
- Letonsaari, Mika. 2015.** Otavan opisto. *Internetix*. [Online] 2015. [Viitattu: 4. 4. 2018.] Saatavilla: http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/fy/fy3/4_valo/402?C:D=iS3j.iPjy&.
- Lindell, Ismo ja Sihvola, Ari. 2002.** *Sähkömagneettinen kenttäteoria*. 4. Helsinki : Otatiето, 2002. Osa/vuosik. 1. Staattiset kentät.
- , **2002.** *Sähkömagneettinen kenttäteoria*. 3. Helsinki : Otatiето, 2002. Osa/vuosik. 2. Dynaamiset kentät.
- Reliant EMC.** [Online] [Viitattu: 16. 4. 2018.] Saatavilla: <https://www.reliantemc.com/Reliant-EMC-Striplines.html>.
- Räisänen, Antti ja Lehto, Arto. 2011.** *Radiotekniikan perusteet*. 13. Helsinki : Otatiето, 2011.
- Savonia-ammattikorkeakoulu.** EMC-laboratorio. [Online] [Viitattu: 26. 3. 2018.] Saatavissa: <http://emc.savonia.fi/>.
- Schaffner. 2000.** RF Emission Testing. *A Handy Guide*. [Online] 2000. [Viitattu: 5. 4. 2018.] Saatavilla: http://www.adler-instrumentos.es/imagenes_web/productos/03_RF_emission_testing_e_2.pdf.

Schwarzbeck Mess-Elektronik. TEMZ 5232 Unsymmetrical Stripline 90 Ω Manual. Germany: Schönaue.

SFSedu.fi. [Online] [Viitattu: 9. 4. 2018.] Saatavilla:
http://www.sfsedu.fi/aihealueet/sahko_ja_elektroniikka/emc.

Sähköherkkyssätiö. Sähköherkkyssätiö.fi. [Online] [Viitattu: 4. 4. 2018.] Saatavilla:
<http://sahkoherkkyssaatio.fi/sahkoherkkyys/>.

Tukes. 2017. [Online] 2017. [Viitattu: 2. 4. 2018.] Saatavissa:
<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkolaitteet1/Sahkolaitteiden-vaatimukset/EMC---sahkomagneettinen-yhteensopivuus/EMC---Sahkomagneettinen-yhteensopivuus/>.

—. 2017. [Online] 2017. [Viitattu: 5. 4. 2018.]
<http://www.tukes.fi/fi/Ajankohtaista/Tiedotteet/Kuluttajaturvallisuus/Tuotteiden-CE-merkinnat-kuntoon/>.

Univeristy of Washington. Clean Energy Institute. *Clean Energy Wiki*. [Online] [Viitattu: 4. 4. 2018.] Saatavilla: http://photonicswiki.org/index.php?title=Electromagnetic_Radiation.

Williams, Tim. 2007. *EMC for Product Designers*. 4. Oxford : Elsevier, Newnes, 2007.